

Automationssystem zur Untersuchung von Gaswechsel- und Transportprozessen an Pflanzen

Vom Fachbereich 12 Maschinenwesen der Universität Duisburg-Essen zur
Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Bernd Proff aus Bochum

Vorsitzender

der Prüfungskommission:

Prof. Dr. Paul Winske

Gutachter:

Prof. Dr. Hans-Joachim Stracke

Prof. Dr. Rudolf Tracht

Prof. Dr. Ulrich Schurr

Tag der mündlichen Prüfung:

16. Dezember 2003

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	v
1 Einleitung	1
2 Ist-Zustand des bisherigen Messsystems für Gaswechsel und Translokation	9
2.1 Charakterisierung des bisherigen Messsystems	9
2.1.1 Hardwaresystem	10
2.1.2 Softwaresystem	11
2.2 Defizite	11
2.3 Fazit	13
3 Grundlagen der pflanzenphysiologischen Messmethoden	15
3.1 Gaswechsellmessungen	16
3.1.1 Grundlagen Gaswechsel	16
3.2 Gaswechselanalytische Messverfahren	17
3.2.1 Geschlossene Gaswechselsysteme	18
3.2.2 Messverfahren bei einem geschlossenen System	19
3.2.3 Offene Gaswechselsysteme	20
3.2.4 Messverfahren bei einem offenen System	21
3.3 Gaswechselsystem der Universität Duisburg-Essen	22
3.4 Translokationsmessungen	24

3.4.1	Grundlagen Stofftransport	24
3.4.2	Translokationsmessungen	29
3.5	Sensoren und Aktoren für das GT _{PROZESSAS}	31
4	Anforderungen an das GT_{PROZESSAS}	35
4.1	Allgemeine Anforderungen	38
4.2	Funktionale Anforderungen	39
4.2.1	Anforderungen an die Steuerung der pflanzenphysiologischen Prozesse	39
4.2.2	Anforderungen an das Messsystem	43
4.2.3	Anforderungen an die Gaswechsel- und Translokationsmessungen	45
4.2.4	Anforderungen an das bildgebende Messverfahren	46
4.3	Anforderungen an die Entwicklungsumgebung	46
5	Auswahl der Entwicklungsumgebung	49
5.1	LabVIEW in der Mess- und Automatisierungstechnik	50
5.2	Grafisch oder Textorientiert?	52
5.3	Fazit	53
6	Konzept des GT_{PROZESSAS}	55
6.1	Grundkonzept für das GT _{PROZESSAS}	55
6.1.1	Struktur	55
6.1.2	Technische Einrichtungen	59
6.1.3	Aufbau des Hardwaresystems	59
6.1.4	Konfiguration des PXI/SCXI-Datenerfassungssystems	62
6.1.5	Erweiterung des Hardwaresystems für Echtzeitapplikationen .	64
6.1.6	Aufbau des Softwaresystems	67
6.2	Programmmodule für die Prozess-Steuerung	71
6.2.1	Allgemein	71
6.2.2	Manuelle Steuerung	73
6.2.3	Programmierbare Steuerung	76
6.2.4	Die Schnittstelle zu Microsoft Excel	78

6.2.5	Die Microsoft Excel Steuertabelle	79
6.3	Programmmodule für das Messsystem	84
6.3.1	Gaswechsellmessungen	85
6.3.2	Translokationsmessungen	100
6.3.3	Bildgebendes Messverfahren	101
7	Konzept für das bildgebende Messverfahren	103
7.1	Konzeption der Hardwareebene	104
7.2	Konzeption der Softwareebene	108
7.2.1	Grundkonzept	109
7.2.2	Das bildgebende Verfahren	112
7.3	Analyse der Bildinformation	112
7.3.1	Bildvorverarbeitung	113
7.3.2	Merkmalsbilder	114
7.3.3	Segmentierung	118
7.3.4	Klassifizierung	121
7.4	Präsentation der Bilddaten	123
7.5	Archivierung der Bilddaten	124
8	Einsatz des GT_{PROZESSAS}	127
8.1	Gaswechsellmessungen an homo- und heterobarischen Blättern	128
8.1.1	Begriff homo- und heterobarisches Blatt	128
8.1.2	Wissenschaftliche Fragestellung	129
8.1.3	Einfluss der Diffusion auf den Gaswechsel	130
8.1.4	Einfluss eines Druckgradienten zwischen Blattkammer und der umgebenden Atmosphäre auf den Gaswechsel	132
8.2	Fazit	133
9	Zusammenfassung und Ausblick	135
	Literaturverzeichnis	136
	Abbildungsverzeichnis	147

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer interdisziplinären Kooperation mit dem Institut für Prozess- und Datenmanagement des Fachbereichs 12- Maschinenwesen, dem Institut für Botanik/Pflanzenphysiologie des Fachbereichs 9- Bio- und Geowissenschaften, Landschaftsarchitektur der Universität Duisburg-Essen sowie dem Institut für Phytosphäre ICG-III am Forschungszentrum Jülich.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Stracke danke ich für die interessante Themenstellung, die engagierte Betreuung und Förderung dieser Arbeit sowie die große Geduld und konstruktiven Diskussionen beim "Zusammenschreiben" der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rudolf Tracht und Herrn Prof. Dr. Ulrich Schurr danke ich für die Übernahme des Koreferats und das Interesse am Fortgang meiner Arbeit.

Herrn Dr. Siegfried Jahnke und Herrn Dipl.- Umweltwiss. Roland Pieruschka danke ich für die gute Aufnahme und Zusammenarbeit am Institut für Botanik/Pflanzenphysiologie.

Meiner Frau Justine danke ich für das immer entgegengebrachte Verständnis und die Unterstützung während der Erstellung meiner Arbeit.

1 Einleitung

Der Mensch hat sich in den Anfängen seiner Existenz noch gänzlich in die ihn umgebende Natur eingefügt und hat als Jäger und Sammler die natürliche Umwelt kaum beeinflusst. Im Verlauf der Menschheitsgeschichte hat jedoch die Entwicklung von Landwirtschaft, Siedlungswesen und Industrialisierung immer stärker und ausgedehnter in das Naturgefüge eingegriffen. Durch diese Vorgehensweise wurden zahllose natürliche Ökosysteme grundlegend verändert oder vernichtet. In Unkenntnis der komplexen Wechselwirkungen in der Natur wurde dabei auch in vielen Fällen das ökologische Gleichgewicht empfindlich gestört. Dieses reicht stellenweise bis zur Verwüstung ganzer Landstriche, so dass heutzutage eine Reparatur der angerichteten Schäden nicht mehr oder nur mit großem Aufwand an Kosten und Energie möglich ist [1].

Die rücksichtslose Entfaltung moderner Industriegesellschaften durch die Menschheit beinhaltet die Gefahr, dass Ökosysteme auf der ganzen Erde bedroht sind und dadurch die Existenzgrundlage für das menschliche Leben nicht mehr gegeben ist [2]. Die politischen Entscheidungsorgane der meisten Industriestaaten erlassen Gesetze zum Schutz und zur sinnvollen sowie nachhaltigen Gestaltung der Umwelt [3]. Damit wird zwar der momentanen Gefahr ein gewisser Einhalt geboten, doch das langfristige ökologische Grundproblem nicht gelöst, wie für die weitere Entwicklung der menschlichen Gesellschaft ein gesundes Wirtschaftswachstum im Einklang mit ökologischen Gesichtspunkten einer gesunden Umwelt gewährleistet werden kann.

Der Mensch ist als Lebewesen Bestandteil der Natur und ihrer Ökosysteme. Er vermag durch sein Handeln diese gezielt umzugestalten, was vor allem seine große

Verantwortung gegenüber der Natur aufzeigt. Bis heute wächst die Gefahr globaler, durch die Tätigkeit des Menschen verursachter Klima- und Bodenverschlechterungen, die mit ihren längerfristigen Auswirkungen einen Teil der Menschheit bedroht [4]. Aufgrund dieser Tatsache gehört es zu den unabdingbaren Voraussetzungen durch weltweit-gespannte Forschungsprogramme und weiter verstärkte Anstrengungen in der Ökosystemforschung die noch bestehenden Wissenslücken zu schließen, damit praktische Entscheidungen zu Umweltfragen stets auf einem wissenschaftlichen Fundament basieren.

Aus den aufgezeigten Aspekten ist es notwendig, Ökosysteme auf lokaler und globaler Ebene zu verstehen. Pflanzen stellen einen wesentlichen Bestandteil der Ökosysteme dar. Fragestellungen bezogen auf die komplexen pflanzenphysiologischen Wechselwirkungen mit der Umwelt sind aus diesem Grunde von großer Bedeutung.

In der Pflanzenphysiologie wird die Abhängigkeit eines Lebensvorganges von Umweltbedingungen im Laboratorium untersucht, wobei jeweils ein Parameter z.B. die Lichtstärke verändert und alle weiteren konstant gehalten werden. Damit werden sehr detaillierte Ergebnisse erreicht, die aber im allgemeinen nicht direkt auf die natürlichen Verhältnisse zu übertragen sind [5]. Die Pflanzenphysiologie ist gezwungen, gleichzeitig mehrere äußerlich veränderliche Faktoren wie Temperatur, Feuchtigkeit, Lichtqualität und -quantität usw. sowie auch die inneren Bedingungen wie Pflanzenalter oder Entwicklungsstadium zu beachten. Dadurch wird die Arbeit außerordentlich komplex und der experimentelle Aufwand umfangreich.

Eine der wichtigsten und am häufigsten angewandten, pflanzenphysiologischen Methoden ist die Gaswechsellmessung, welche sowohl für die Erfassung der Reaktionskinetik wie auch zur Klärung vieler Teilreaktionen der Photosynthese eingesetzt wird [6]. Schon in den vergangenen 150 Jahren ist eine Vielzahl von qualitativen und quantitativen Messmethoden zur Anwendung gekommen, mit denen der Gesamtprozess oder einzelne Teilvorgänge des Gaswechsels zwischen Pflanze und Umwelt mehr oder weniger exakt untersucht werden konnten. Mit der zunehmenden Vervollkommnung der Untersuchungsmethoden sind immer wieder neue Erkenntnisse über den Ablauf

der Gaswechselprozesse sowie über dessen Abhängigkeit von einer ganzen Reihe von Faktoren erzielt worden. Wesentliche Fortschritte in den Erkenntnissen sind in diesem Zusammenhang durch eine Verbesserung der Modelle, mit denen wir uns die Lebensvorgänge erklären und durch eine Verfeinerung der angewandten Messmethodik erzielt worden [7].

Dabei gewährleistet der Einsatz von Systemen unter Verwendung von Testkammern für eine kontrollierte Umgebung einen hohen Grad an Kontrolle externer Parameter, mit denen die Wachstumsbedingungen der Versuchspflanzen mehr oder weniger stark modifiziert werden. So werden im Inneren abgeschlossener Versuchskammern vielfach Bedingungen geschaffen, die den Gasaustausch der Pflanze beeinflussen. Zu den Faktoren, die häufig artifizielle Bedingungen für den Gasaustausch der Pflanze mit ihrer Umgebung schaffen, gehören in erster Linie die Luftbewegung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie die Lichtstärke [8]. Die Betrachtung dieser Faktoren ist von großer und vielfach entscheidender Bedeutung für die Brauchbarkeit und die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Gerade die Genauigkeit der Messungen bildet die Grundlage für die Zuverlässigkeit, wie sich Pflanzen im globalen Wandel verhalten werden. Die durch Einzelmessungen an Pflanzen oder an Pflanzenteilen (z.B. den Blättern) gewonnenen Erkenntnisse sollen genutzt werden, um Untersuchungen auf Bestandesebene interpretierbar zu machen [9]. Dafür müssen weitgehend realitätsnahe Voraussetzungen geschaffen werden, ein Anspruch, der immer eine wesentliche Zielsetzung für wissenschaftliche Vorgehensweise ist.

Ein wichtiger Aspekt der Gaswechselprozesse in Pflanzen ergibt sich aus der globalen Erhöhung der atmosphärischen Kohlendioxid (CO_2)-Konzentration. Dazu entwickelte sich im Verlauf der letzten Jahre ein breiter Konsens darüber, dass die Emission von Treibhausgasen, insbesondere von CO_2 , einen Einfluss auf das globale Klima [10] ausübt. Dabei ist von besonderer Bedeutung, dass eine steigende atmosphärische CO_2 -Konzentration pflanzliche Aktivitäten auf physiologischer, biochemischer und molekularer Ebene beeinflusst [11, 12, 13].

Seit Beginn der Industrialisierung stieg die atmosphärische CO_2 -Konzentration von 280 auf 370 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ [10]. Dies entspricht einem Anstieg von 32% mit einer gegenwärtigen, durchschnittlichen, jährlichen Zunahme von 1,5 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Der zunehmende anthropogene Verbrauch von fossilen Energieträgern sowie eine veränderte Landnutzung tragen wesentlich zum stetigen Anstieg des atmosphärischen CO_2 bei. Die zukünftigen Aktivitäten der Menschen werden durch die Emission von Treibhausgasen sowie die daraus resultierenden Klimaveränderungen deutlich beeinflusst. Diesbezüglich wurden viele Klimamodelle [14, 15] erstellt, um die zukünftige Entwicklung abzuschätzen. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts soll dabei die CO_2 -Konzentration auf Werte zwischen 540 und 970 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ansteigen. Diese Auswirkung könnte einen globalen Anstieg der Temperatur zwischen 1,4 und 5,8 $^{\circ}\text{C}$ verursachen [10, 16].

Neben der Untersuchung der Photoassimilation ist der damit im direkten Zusammenhang stehende Transport von Photoassimilaten (Kohlenhydraten, Aminosäuren u.a.) ein wichtiger Aspekt. In Pflanzen erlauben viele verschiedene Netzwerke die Aufnahme, Verarbeitung und Weitergabe von Stoffwechselprodukten sowie eine Signalübertragung [17, 18]. Die Weiterleitung über längere Distanzen geschieht über Systeme, welche die gesamte Pflanze durchziehen. Solche Systeme stellen in höheren Pflanzen die Leitbündel dar, die aus Xylem und Phloem aufgebaut sind [19].

Der Ferntransport von Wasser, Nährstoffen und auch organischen Verbindungen, von der Wurzel in den Sproß, erfolgt in den Gefäßen des Xylems. Der Xylemtransport ist in der Regel unidirektional aufwärts gerichtet und wird angetrieben vor allem über die Transpiration (Wasserabgabe) der Blätter [20, 21].

Bei dem Wasser- und Nährstofftransport im Xylem muß die Interaktion zwischen Xylem und Phloem, dem zweiten Ferntransportsystem höherer Pflanzen, berücksichtigt werden. Im Gegensatz zum Xylem erfolgt der Phloemtransport in lebenden Zellen [22]. Die Flußrichtung und die Flußrate wird im wesentlichen durch die Aktivität der Phloementladung durch die *sink* Gewebe, z.B. wachsenden Blättern, Blüten, Früchte und Wurzeln bestimmt [20]. Über das Phloem werden solche *sink* Gewebe mit Kohlenhydraten und anderen Assimilationsprodukten aus den photosynthetisch

aktiven Blättern versorgt [23, 24, 25].

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge sind Kenntnisse über die Art und den Umfang der transportierten Verbindungen, die Veränderung ihrer Verteilung im Transportstrom aufgrund unterschiedlicher Umwelteinflüsse oder Funktionen verschiedener Organe auf diese Verteilung eine wichtige Grundlage für das Verständnis des Stofftransportes.

Wissenschaftliche Anforderungen

Die aufgezeigten Aspekte bei den Gaswechsel- und Transportprozessen in Pflanzen verdeutlichen, dass wissenschaftliche Aussagen der Reaktion pflanzlicher Mechanismen auf äußere Einflüsse von großer Bedeutung sind. Aufgrund der Komplexität der biologischen Phänomene beschäftigen sich in diesem Zusammenhang eine Vielzahl von Forschungsinstituten mit den damit verbundenen Fragestellungen.

Im Rahmen des CO₂-Schwerpunktprogramms "Stoffwechsel und Wachstum der Pflanzen unter erhöhter CO₂-Konzentration" der DFG ist u.a. auch die Universität Duisburg-Essen, in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich, integriert. In diesem Forschungsprogramm sollen der Stoffwechsel und das Wachstum der Pflanze bei erhöhter CO₂-Konzentration erforscht werden. Dabei geht es nicht um eine Beschreibung der Reaktion, sondern um die Aufklärung der grundlegenden Regulationsmechanismen, die für die Steuerung der Photosyntheserate, des Wasserverlustes, der Biomasseverteilung, der Speicherung und des Wachstums von entscheidender Bedeutung sind. Im Rahmen der Kooperation sollen folgende Themenkreise bearbeitet werden:

- **Photosynthese:** Es wird untersucht (a), ob sich die Zusammensetzung des Photosyntheseapparates als Anpassung an die erhöhte CO₂-Konzentration ändert und (b) ob und wie ein Anstau von Kohlenhydraten zu einer Hemmung der Photosynthese führt. Zu beiden Fragen sollen durch ökophysiologische Methoden (Gaswechsel) Antworten gefunden werden. Die Ergebnisse sollen dazu

dienen, existierende mechanistische Modelle der Photosynthese zu verbessern.

- **Die Regulation der Sink-Source Wechselwirkungen:** Das Ziel ist, Mechanismen zu entdecken, die erklären, wie die Translokation von Assimilaten und die Zusammensetzung der wachsenden Organe durch ein verändertes Angebot an Kohlenhydraten gesteuert wird.

Für eine inhaltliche Umsetzung der in diesem Forschungsprogramm diskutierten Aspekte besteht grundsätzlich die Problematik, dass eine flexible und zuverlässig reproduzierbare Beeinflussung verschiedener äußerer Faktoren bei der Untersuchung der Gaswechsel- und Transportprozesse notwendig ist. Aufgrund dieser Tatsache beschäftigen sich im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit das Institut für Prozess- und Datenmanagement des Fachbereichs 12- Maschinenwesen, das Institut für Botanik/Pflanzenphysiologie des Fachbereichs 9- Bio- und Geowissenschaften, Landschaftsarchitektur an der Universität Duisburg-Essen und das Institut für Phytosphäre (ICG-III) am Forschungszentrum Jülich mit der Konzeption eines Systems, welches durch Automation der Steuerung der äußeren Einflüsse für die Gaswechsel- und Transportprozesse eine Durchführung von reproduzierbaren wissenschaftlichen Experimenten ermöglicht. Die Grundlage dafür bildet ein Verfahren, mit welchem Experimente mit komplizierten Versuchsdurchführungen geplant und durch ein Automationssystem ausgeführt werden. Durch diese Vorgehensweise eröffnen sich neue Perspektiven bisher nicht durchführbarer pflanzenphysiologischer Untersuchungen.

Die wissenschaftlichen Fragestellungen gehen jedoch in diesem Forschungsvorhaben deutlich weiter und lassen sich allein mit den angesprochenen pflanzenphysiologischen Messverfahren für die Gaswechsel- und Translokationsuntersuchungen nicht beantworten. Wichtige Aspekte z.B. wie weit die Umwelteinflüsse das Pflanzenwachstum oder die Blattmorphologie verändern, bleiben durch diese Verfahren unbeantwortet. Einen Ansatz für die Lösung dieser Fragestellungen ist in Kombination mit einem bildgebenden Messverfahren zu beantworten. Diese Erweiterung eröffnet erstmals die Möglichkeit, pflanzenphysiologische Messmethoden mit einem bildgebenden Messverfahren zu kombinieren und stellt damit eine breite Basis für einen Einsatz in

diesem und nach entsprechender Transformation in zukünftigen Forschungsvorhaben dar.

Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen einer Dissertation soll ein Konzept erstellt werden, mit der Zielsetzung, die aufgezeigten wissenschaftlichen Anforderungen durch den Einsatz des **GTPROZESSAS**¹ zu beantworten.

Die Herleitung des Konzepts beginnt zunächst mit der Problemstellung. Dazu werden der Stand der Technik bei der Untersuchung von Gaswechsel- und Transportprozessen sowie die Defizite analysiert. Aufgrund der Schwachpunkte und den erweiterten wissenschaftlichen Fragestellungen lassen sich die Anforderungen an das **GTPROZESSAS** ableiten.

Nach Erarbeitung eines allgemeinen Verständnis für die pflanzenphysiologischen Messmethoden wird zunächst die Grundidee für das **GTPROZESSAS** aufgezeigt. Auf dieser Basis wird das Konzept für das **GTPROZESSAS** mit seiner Soft- und Hardwarestruktur entwickelt und vorgestellt. Es wird dargestellt, wie mit dem entwickelten Konzept ein wirklicher Fortschritt bei der Untersuchung von pflanzenphysiologischen Vorgängen erzielt werden kann.

Eine vollständige softwaremäßige Umsetzung des vorgestellten **GTPROZESSAS** ist im Rahmen einer Dissertation nicht möglich. Der Aufwand für die vollständige Softwareerstellung des **GTPROZESSAS** beträgt mehrere Mannjahre. Die Funktionsfähigkeit des Konzepts wird im Bereich der Gaswechselfmessungen demonstriert. Dort werden Aspekte des Gaswechsels an homo- und heterobarischen Blättern, in Bezug auf eine laterale Diffusion und dem druckabhängigen Massenfluss in den Blattinterzellularen, diskutiert.

¹GTPROZESSAS: **G**aswechsel- und **T**ransport**prozess** **A**utomationssystem

2 Ist-Zustand des bisherigen Messsystems für Gaswechsel und Translokation

Die Motivation, ein neues und zukunftsweisendes **GTprozessAS** für die Beeinflussung von Gaswechsel- und Transportprozessen in Pflanzen zu konzipieren und zu realisieren, ergibt sich aus einem breiten Spektrum pflanzenphysiologischer Fragestellungen, die Bestandteil eines Forschungsvorhabens am Institut für Botanik/Pflanzenphysiologie der Universität Duisburg-Essen sind und die näher aufgezeigt werden. Diese Zielsetzung definierte sich auch durch den Zustand des alten Messsystems, welches strukturell und technologisch keinen weiteren Gestaltungsraum für notwendige Modifikationen bzw. Erweiterungen zuließ. Im folgenden wird der Ist-Zustand des bisherigen Messsystems charakterisiert und die Defizite aufgezeigt.

2.1 Charakterisierung des bisherigen Messsystems

Das eingesetzte System charakterisiert sich aus der Funktionalität als ein reines Messsystem. Dieses besteht aus einzelnen Teilsystemen für den Gaswechsel und die Translokation - verteilt auf zwei Rechnersysteme - sowie einem Messgerät (CIRAS CO₂/H₂O-Gasanalysator). Dieses Messsystem wird im weiteren in ein Hard- und Softwaresystem strukturiert und charakterisiert.

2.1.1 Hardwaresystem

Die Abbildung 2.1 verdeutlicht die Grundstruktur des Hardwaresystems (Rechnerhardware und Prozessperipherie) mit der Fragmentierung in die Teilsysteme für die Gaswechsel-, Translokationsmessungen, einem CO₂/H₂O-Gasanalysator und entsprechende Aktoren für eine manuelle Beeinflussung der Prozessgrößen.

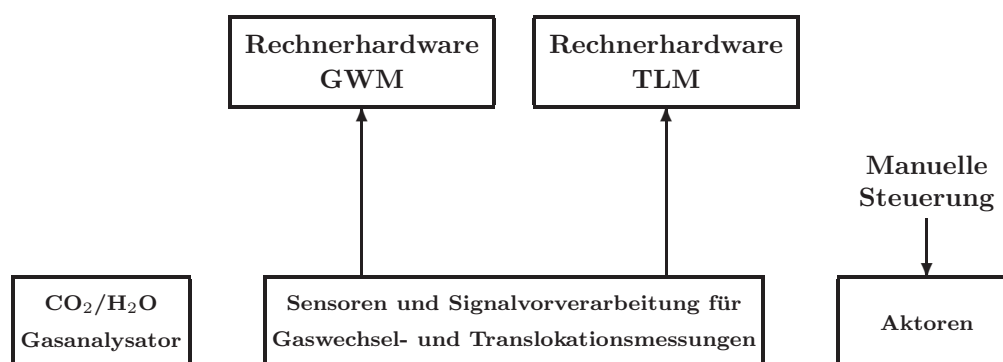


Abbildung 2.1: Stark vereinfachte Darstellung der Grundstruktur des Hardwaresystems für Gaswechsel- und Translokationsmessungen, **GWM:** Gaswechsellmessungen, **TLM:** Translokationsmessungen

Die Konfiguration der eingesetzten Rechnerhardware basierte auf 486er Prozessorsystemen mit einer ISA¹-Bus Struktur. Über Messwerterfassungskarten wurde die Schnittstelle zu den Sensoren/Signalvorverarbeitung hergestellt.

Die erforderliche Signalvorverarbeitung bestand im analogen Bereich nur für die Temperaturmessungen. Für die dazu eingesetzten Thermoelemente sind Verstärkerkomponenten durch die Arbeitsgruppe entwickelt und aufgebaut worden. In Analogie dazu sind auch die Zählerstrukturen, welche für die Messung des Stofftransportes mittels Radiotracer-Techniken benötigt wurden, durch einen Eigenbau realisiert. Eine

¹ISA: **I**ndustrie **S**tandard **A**rchitecture. Der ISA-Bus ist ein von IBM 1981 eingeführtes standardisiertes Bussystem für den PC. Am Anfang war ISA ein 8-Bit-System und wurde 1984 zum 16-Bit-System erweitert (in dieser Form wird ISA auch AT-Bus genannt). Die Taktfrequenz für den ISA-Bus liegt bei 8 MHz (16-Bit-System), welches einer maximalen Datenübertragungsrate von 4 MByte/s entspricht.

Kommunikation mit dem Rechnersystem ist dabei über eine entsprechende Schnittstellenkarte möglich.

2.1.2 Softwaresystem

Das Softwaresystem beinhaltet die Anwender- und die Systemsoftware. Dazu sind unter der Anwendersoftware die beiden Programme für die Gaswechsel- und Translokationsmessungen einzuordnen. Beide Programme sind mit dem funktionalen Umfang für die Erfassung, Analyse, Visualisierung und Archivierung der Messdaten im Jahr 1990 (Borland Turbo Pascal) entwickelt worden.

Unter der Systemsoftware ist lediglich Windows 95 als das Betriebssystem zu nennen, da keine weiteren systemspezifischen Programme eingesetzt wurden.

2.2 Defizite

Die Defizite des bisherigen Systems ergeben sich in den Bereichen:

- *Fragmentierung*
- *Modularität und Erweiterbarkeit*
- *Steuerung der Prozessgrößen*
- *Funktionale Einschränkungen*

Fragmentierung

Durch die Fragmentierung des Messsystems im Bereich der Hard- und Software wird das Experiment nicht als das zu messende Objekt betrachtet, sondern in unabhängige Teilsysteme für den Gaswechsel, die Translokation und einem Einzelgeräte aufgeteilt. Eine zeitsignifikante oder gekoppelte Datenanalyse aus den Teilsystemen ist damit während der Versuchsdurchführung *online* nicht möglich. Eine Interpretation

der Messergebnisse aus dem durchgeführten Experiment war daher nur durch den Einsatz von zusätzlicher Software zu erreichen. Für eine solche Auswertung müssen alle selektiv aufgezeichneten Messdaten mit einem entsprechenden Programm zusammengefasst und der Zeitbezug zu den Teilsystemen hergestellt werden. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass erst nach Ablauf der zeitaufwendigen Experimente eine Interpretation des Versuchsablaufes möglich ist. Damit kann eine laufende Versuchsdurchführung nicht mehr korrigiert werden, was sowohl zeitlich als auch inhaltlich zu erheblichen Problemen führte.

Modularität und Erweiterbarkeit

Wird das vorhandene Hardwaresystem unter dem Gesichtspunkt der Modularität betrachtet, so ist dabei die veraltete Technologie der Rechnersysteme zu nennen, welche die Kriterien an diese nicht erfüllen. Der primäre Grund dafür ist die ISA-Bus Struktur, welche zum heutigen Zeitpunkt keine Basis für Einsatz neuer Komponenten aus dem Bereich der Mess- und Automatisierungstechnik ist.

Die Modularität im Softwarebereich beinhaltet, dass Module Funktionsgruppen abbilden, die unabhängig von einander sind. Ganz auffällig war diese Unabhängigkeit bei den beiden Teilsystemen für den Gaswechsel und die Translokation gegeben. Werden die Programme für sich betrachtet, so besteht durch die unzureichende Strukturierung der Einzelprogramme das Problem, diese in ein Messsystem zu integrieren. Aus diesem Grund ist auch eine funktionale Erweiterung nicht sinnvoll bzw. nur durch eine Neustrukturierung möglich.

Steuerung der Prozessgrößen

Eine rechnergestützte Steuerung der Aktoren und damit verbundene Beeinflussung der Prozessgrößen ist mit dem vorhandenen Messsystem nicht möglich. Die Prozesse können nur über manuelle Eingriffe in das System (Magnetventile, Gasmischsysteme) gesteuert werden. Flexibele und reproduzierbare Versuchsdurchführungen waren damit sehr eingeschränkt oder sogar unmöglich.

Durch die zeitkritische Steuerung des Versuchsablaufes von Experimenten im pflanzenphysiologischen Bereich beinhaltet der manuelle Eingriff auch eine deutliche Einschränkung bezüglich der Komplexität des Experiments, da dies eine große Anzahl von Interaktionen durch den Anwender erfordert. Gerade zeit- und funktionsaufwendige Versuchsdurchführungen sind mit dieser Vorgehensweise nicht umzusetzen.

Funktionale Einschränkungen

Unter Funktionalität ist hier die Bandbreite für den Einsatz eines Mess- oder Automatisierungssystem definiert. Wird das vorhandene Gesamtsystem unter diesen Gesichtspunkten betrachtet, so ist es von der Funktionalität ein Messsystem, welches die grundlegend gestellten Anforderungen (Datenerfassung, Analyse, Visualisierung und Archivierung) an ein Messsystem erfüllt. Erweiterte Funktionalitäten in Bezug auf Zeitsignifikanz und Synchronität der Teilsysteme sind jedoch nicht gegeben. Fragestellungen, wobei diese Eigenschaften gefordert sind, gerade auch in Bezug auf die Kombination von unterschiedlichen Teilsystemen, können mit diesem Gesamtsystem nicht beantwortet werden.

2.3 Fazit

Das bisherige Messsystem für Gaswechsel- und Translokationsuntersuchungen sowie die dabei eingesetzte Technologie ließ vom heutigen Standpunkt aus betrachtet keine weiteren Modifikationen oder Erweiterungen zu. Funktional erfüllte das Messsystem zwar die grundlegenden Funktionen, wies aber deutliche Defizite für einen erweiterten Einsatz bei neuen wissenschaftlichen Fragestellungen auf. Dieses traf insbesondere auf die Prozess-Steuerung zu.

3 Grundlagen der pflanzenphysiologischen Messmethoden

Bei den in diesem Kapitel erörterten Messmethoden handelt es sich um die Beschreibung von Messverfahren, die geeignet sind, Gaswechsel- und Translokationsprozesse der Pflanzen unter den gegebenen Bedingungen - besonders auch in ihrer Abhängigkeit von dem Gesamtverlauf beeinflussender Faktoren - zu quantifizieren.

In der pflanzenphysiologischen Literatur wird dabei zwischen den physiologischen und ökologischen Methoden unterschieden. Unter den physiologischen Methoden sind solche zu verstehen, die zur Erfassung oder zur Erforschung von Teilvorgängen der Prozesse an Pflanzen in ihrer Abhängigkeit von einer Reihe von Faktoren unter konstanten, meist nur im Laboratorium herstellbaren und jederzeit reproduzierbaren Bedingungen geeignet sind. Die ökologischen Methoden ermöglichen entsprechende Messungen an den verschiedenen Standorten der Pflanzen, also unter mehr oder weniger stark wechselnden klimatischen und edaphischen Verhältnissen.

Die für das Konzept des **GTPROZESSAS** berücksichtigten Messmethoden sind physiologisch ausgerichtet und werden physikalisch durch die an der Universität Duisburg-Essen konzipierten Gaswechselanlage umgesetzt. Diese Anlage ist daher als die Basis zu sehen, mit deren Hilfe spezielle physikalische Messverfahren die pflanzenphysiologischen Prozessgrößen erfassen können. Der Einsatz der Gaswechselanlage geht jedoch deutlich weiter und beinhaltet nicht nur die Erfassung der

einzelnen Prozessgrößen, sondern durch die Integration von Aktoren können die einzelnen Prozesse beeinflusst werden.

Aufgrund der zentralen Funktion der Gaswechselanlage für das **GTPROZESSAS** wird in diesem Kapitel diese Anlage vorgestellt und die damit gekoppelten pflanzenphysiologischen Messmethoden für Gaswechsel- und Translokationsprozesse erörtert.

3.1 Gaswechsellmessungen

3.1.1 Grundlagen Gaswechsel

Der Begriff Gaswechsel beschreibt im pflanzenphysiologischen Zusammenhang den Austausch von Gasen zwischen der Pflanze und der Atmosphäre. Primär sind daran das Kohlendioxid (CO_2), der Sauerstoff (O_2) und das Wasser in Form von Wasserdampf (H_2O) beteiligt. Daneben findet auch ein Austausch von z.B. Stickoxiden, Schwefeldioxid, Ozon etc. statt, die den Stoffwechsel von Pflanzen zum Teil erheblich beeinträchtigen können [5]. Diese werden hier jedoch nicht berücksichtigt, da die im Rahmen dieser Arbeit beschriebene Gaswechselanlage für den Austausch von CO_2 , und H_2O konzipiert ist.

Photosynthese, Atmung (Dunkelatmung), Photorespiration und Transpiration sind die wichtigsten metabolischen Vorgänge, die an der Aufnahme bzw. Abgabe dieser Gase bei Pflanzen beteiligt sind [26, 27, 28]. Diese Vorgänge beschreiben den CO_2 , O_2 und H_2O Austausch zwischen der Pflanze und der Umgebungsluft. Für die Untersuchung dieser Prozesse sind gaswechselanalytische Messverfahren erforderlich, welche im folgenden diskutiert werden.

3.2 Gaswechselanalytische Messverfahren

Die Methodik der Gaswechselanalyse beruht auf kombinierten Messsystemen, die als offene oder geschlossene Gaswechselsysteme bezeichnet werden. Abhängig von den biologischen Fragestellungen und Anforderungen können beide Systeme in unterschiedlichen Kombinationen realisiert werden. Die Messprinzipien sind jedoch bei allen offenen und geschlossenen Gaswechselsystemen gleich, da sie auf die gleichen Messkomponenten zurückzuführen sind.

Allen Verfahren ist gemeinsam, dass sie Unterschiede von CO_2 -Konzentrationen oder dem Wasserdampfpartialdruck zwischen einem vom Blatt unbeeinflussten Referenzwert und einem durch die Assimilation oder Transpiration veränderten Luftvolumen in speziellen Blattkammern (Messküvetten) registrieren. Diese Unterschiede lassen sich mit Infrarot-Gasanalysatoren¹ (IRGA) detektieren. Dabei wird entweder in bestimmten Zeitintervallen (geschlossenes System) oder durch ständigen Vergleich unbeeinflusster mit der durch das Blatt veränderten Luft (offenes System) gemessen. Da beide Verfahren bei den Gaswechselsystemen von großer Bedeutung, sowie integraler Bestandteil der Gaswechselanlage an der Universität Duisburg-Essen sind, werden die grundsätzlichen Messprinzipien (siehe Kapitel 3.2.1 und 3.2.3) vorgestellt und die Vor- und Nachteile kurz angesprochen. Auf Details wird hier jedoch verzichtet, da die einzelnen Methoden in der Literatur [7, 29] bereits ausführlich erläutert wurden.

¹Bei einem Infrarot-Gasanalysator (IRGA) werden mit Hilfe einer Messzelle sowohl absolute CO_2 - als auch H_2O -Konzentrationen in den gleichen Strahlengängen gemessen. Die beiden Gase werden über ihre spezifischen Absorptionsbanden im Infrarotbereich optisch durch entsprechende Filter getrennt. Durch die Integration einer zusätzlichen Referenzzelle kann ein IRGA auch die Messung von differentiellen CO_2 - als auch H_2O -Konzentrationen eingesetzt werden.

3.2.1 Geschlossene Gaswechselsysteme

Die Abbildung 3.1 (a) zeigt das Schema eines einfachen geschlossenen Gaswechselsystems mit den minimal erforderlichen Systemkomponenten. Diese bestehen aus der eigentlichen Blattkammer als Messküvette für das zu untersuchende Blatt, einer Pumpe und einem IRGA für die Messung des Partialdruckes von CO_2 und H_2O . In Abbildung 3.1 (b) wird das einfache Gaswechselsystem ergänzt mit einem Neben-

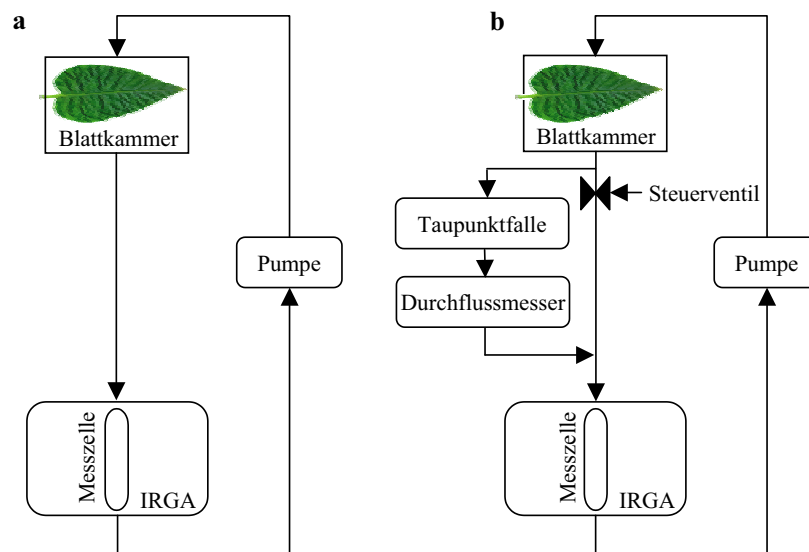


Abbildung 3.1: Prinzipieller Aufbau eines geschlossenen Gaswechselsystems, (a) einfachster Aufbau für ein geschlossenes System, (b) geschlossenes System mit Nebenschluss zur H_2O -Kompensation (Taupunktfalle), das je nach Fragestellung auch durch eine CO_2 -Kompensation ergänzt werden kann

schluss, durch den die Luftfeuchtigkeit im System mittels Taupunktfalle konstant gehalten werden kann. Dieses ist erforderlich, da aufgrund der Transpirationsleistung des Blattes die relative Luftfeuchte schnell 100% erreicht und Wasser im System unkontrolliert auskondensieren kann.

Ein wesentlicher Nachteil des geschlossenen Systems ist die kontinuierliche Anreicherung von Wasserdampf und eine Änderung der CO_2 -Konzentration (Anreicherung bei der Atmung oder Abreicherung bei der Photosynthese). Diese Prozesse müssen

dann aufwendig kompensiert werden, wie zum Beispiel durch einen Nebenschluss (Abb. 3.1 (b)), mit welchem die H_2O -Konzentration konstant gehalten werden kann.

Die Vorteile des geschlossenen gegenüber dem offenen System sind die hohe Messempfindlichkeit des Systems aufgrund akkumulativer Effekte im geschlossenen Kreislauf, der einfache Aufbau und die geringeren Kosten für den IRGA, da nur eine Messzelle benötigt wird (absolut messender CO_2 -Gasanalysator).

3.2.2 Messverfahren bei einem geschlossenen System

In geschlossenen Gaswechselmesssystemen zirkuliert die zu messende Luft kontinuierlich und mit konstantem Durchfluss durch Pumpe, Blattkammer und Messzelle des IRGAs. In festgelegten Zeitabständen Δt wird der Partialdruck von CO_2 und H_2O in der Luft gemessen. Durch Division mit dem Luftdruck können daraus rechnerisch die Molenbrüche für CO_2 - und die H_2O -Konzentrationen der Luft bestimmt werden.

Wenn das eingespannte Blatt Photosynthese betreibt, sinkt der CO_2 -Gehalt im System. Gleichzeitig kommt es dazu, hervorgerufen durch die Transpiration des Blattes, dass H_2O -Moleküle in beträchtlichem Maße aus dem Blatt in das Gaswechselsystem übertreten. Dadurch ändert sich ständig die CO_2 - und H_2O -Konzentration im gesamten System. Aus den Änderungsraten $(C_t - C_{t+1})/\Delta t$ läßt sich die Assimilation und mit $(H_t - H_{t+1})/\Delta t$ die Transpiration mit den folgenden Gleichungen berechnen:

$$A = \frac{(C_t - C_{t+1}) V_s}{\Delta t B} \quad \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (3.1)$$

$$T = \frac{(H_t - H_{t+1}) V_s}{\Delta t B} \quad \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (3.2)$$

wobei C_t und C_{t+1} die CO_2 -Konzentration in $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol}$ Luft bzw. H_t und H_{t+1} in $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{mol}$ Luft die Wasserdampfkonzentration am Anfang und Ende eines Messintervalls ist. V_s berücksichtigt dabei, als eine rein rechnerische Größe, die effektive Luftmenge im System (in mol), die abhängig ist von dem Gesamtvolumen des

Systems, der Temperatur und des Luftdruckes und B die projizierte assimilierende Blattoberfläche.

Wird die Änderung der H_2O - und CO_2 -Konzentration durch einen Nebenschluss kompensiert, muss dies bei der Berechnung der jeweiligen Transpiration bzw. Photosyntheserate berücksichtigt werden. Die ausführlichen Berechnungen von V_s sind in der Literatur [29, 30] aufgeführt.

3.2.3 Offene Gaswechselsysteme

Die Abbildung 3.2 zeigt das Schema eines einfachen, offenen, differentiellen Gaswechselsystems mit den erforderlichen Systemkomponenten. Diese bestehen aus der ei-

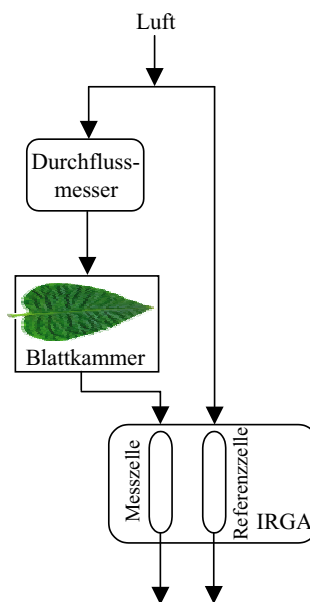


Abbildung 3.2: Prinzipieller Aufbau eines einfachen, offenen, differentiellen Gaswechselsystems

gentlichen Blattkammer als Messküvette für das zu untersuchende Blatt, dem Durchflussmesser und dem IRGA für die Messung des Partialdruckes von CO_2 und H_2O . Da die Konfiguration der offenen Systeme je nach biologischer Fragestellung stark

variiert, wird hier nur grundlegend auf das einfache Gaswechselsystem eingegangen und auf die Literatur [7] verwiesen, wo weitere Modelle beschrieben sind.

Vorteile des offenen im Vergleich zum geschlossenen System bestehen darin, dass Konzentrationsänderungen von CO_2 und Wasserdampf aufgrund eines Durchsatzes von Luft bekannter Zusammensetzung durch die Blattkammer begrenzt werden [31]. Weiterhin lassen sich offene Systeme zur Messung von dynamischen Veränderungen bei der Photosynthese besser verwenden als geschlossene, denn sie registrieren dynamische, im Sekundenbereich liegende Veränderungen der CO_2 -Konzentration relativ zu einem konstanten Wert.

3.2.4 Messverfahren bei einem offenen System

Im einfachen offenen System (Abb. 3.2) wird Luft über ein Pumpsystem oder aus einem Druckzylinder in das Messsystem geleitet und der Luftstrom, der in die Blattkammer eintritt, ermittelt. Nach dem Verlassen der Blattkammer wird die CO_2 - und H_2O -Konzentration in der Messzelle des IRGA gemessen und mit den Messwerten aus der Referenzzelle verglichen. Danach tritt die Luft aus dem IRGA aus und wird nicht wieder in das System zurückgeführt. Aus der Differenz der CO_2 -Konzentration der Luft nach dem Austritt aus der Blattkammer und der vor dem Eintritt in diese, dem Luftstrom F (mol s^{-1}) und der Blattoberfläche B (m^2) folgt die Nettoassimilationsrate mit folgender Gleichung:

$$A = \frac{\Delta C F}{B} \quad \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (3.3)$$

Analog gilt für die Berechnung der Transpirationsrate:

$$T = \frac{\Delta H F}{B} \quad \text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (3.4)$$

mit ΔH als der Differenz der Wasserdampfkonzentration nach dem Austritt und vor dem Eintritt in die Blattkammer. Die Transpirationsrate führt im Ausgang der Blattkammer zu einem Anstieg des Wasserdampfpartialdruckes und damit zu einer Erniedrigung des Partialdruckes aller übrigen Gase. Dieser sogenannte Wasserverdünnungs-

effekt muß als Korrekturwert bei der Berechnung der CO_2 -Austauschraten unbedingt berücksichtigt [32] oder noch besser experimentell vermieden [29] werden.

3.3 Gaswechselsystem der Universität Duisburg-Essen

Die Gaswechselanlage ist im gesamten Automatisierungssystem eine zentrale Einrichtung. Mit deren Hilfe kann der Einfluss auf die physikalischen Prozessgrößen von Gaswechsel und Translokation gesteuert, aber auch Informationen über den Verlauf der Prozessgrößen erfasst werden. Da die Konzeption des Automatisierungssystems auf dieser Anlage basiert, werden im weiteren einige grundlegende Aspekte vorgestellt.

Abb. 3.3 (a) zeigt das stark vereinfachte Gesamtschema der Gaswechselanlage. Dargestellt sind die Einzelkomponenten sowie die Wege der Eingangsgase durch die gesamte Anlage. Hinsichtlich der wissenschaftlichen Anforderungen kann die Gaswechselanlage sowohl als geschlossene, periodisch geschlossene oder offene betrieben werden. Eine einfache Darstellung der unterschiedlichen Einsatzarten zeigen Abb. 3.3 (b) und Abb. 3.3 (c). Aufgrund dieses modularen Aufbaus kann die Gaswechselanlage für die unterschiedlichen pflanzenphysiologischen Experimente flexibel konfiguriert werden.

Einige Details zu diesem System: Als Gase werden hier nur CO_2 -freie Luft und CO_2 verwendet. Sind zusätzliche Eingangsgase erforderlich, so kann die Anlage erweitert werden, indem zu den beiden Massendurchfluss-Kontrollern MFC1 und MFC2 weitere parallel angeordnet werden. Die Eingangsgase werden über die Gasmischkammer MX1 zusammengeführt. Mit diesen Eingangselementen und dem IRGA kann eine spezifizierte Gaskonzentration im Gesamtsystem eingestellt werden. Die erforderliche Luftfeuchte wird mit den Elementen: Luftbefeuchter (Hm1) und Kältefalle (DP1) realisiert.

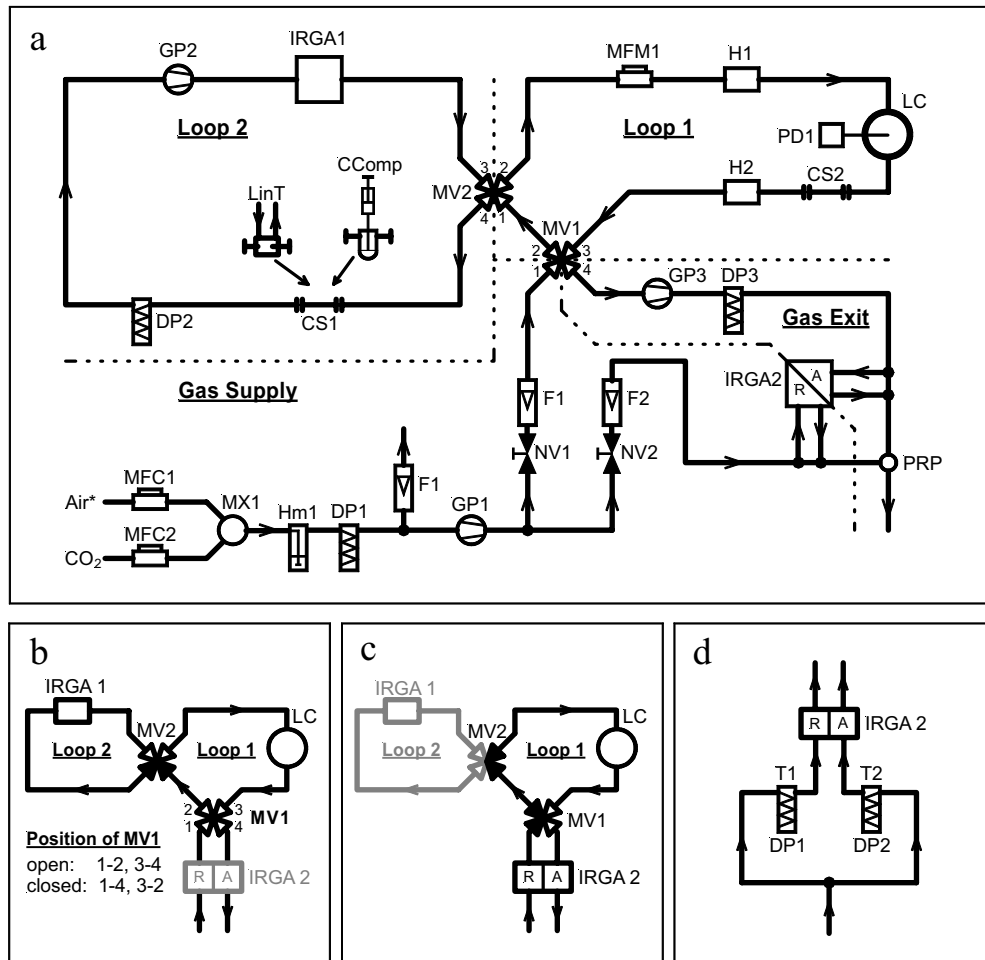


Abbildung 3.3: Vereinfachte Gesamtdarstellung der Gaswechselsanlage, (a) Gesamtdarstellung der Gaswechselsanlage mit ihren Einzelkomponenten und die Wege der Eingangsgase, (b) geschlossenes Gaswechselsystem, (c) offenes Gaswechselsystem (d) Testanordnung zur Überprüfung des Einflusses des Wasserdampfpartialdruckes auf die CO₂-Differenzmessungen im IRGA2, (Air): CO₂ freie Luft, (CComp): CO₂-Kompensationseinheit, (CO₂): Kohlendioxid, (CS): Messanschluss, (DP): Kältefalle, (F): Durchflussmesser, (GP): Gaspumpe, (H): Feuchtesensor, (IRGA1): absoluter IRGA, (IRGA2): differentieller IRGA; Analysierende (A)- und Referenz (R) Messzelle, (LC): Blattkammer, (LintT): Kammer zum Testen der Linearität des IRGA, (MFC): Massendurchfluss-Kontroller, (MFM): Massendurchfluss-Messgerät, (MV): Magnetventil, (MX): Gasmischkammer, (NV): Nadelventil, (PD): differentieller Druckmesser, (PRP): Druckreferenzpunkt, (R): Referenzzelle IRGA2, (T): Temperatur, Quelle: [29]

Mit den beiden Magnetventilen MV1 und MV2 kann das Gaswechselsystem sowohl als offenes oder geschlossenes System konfiguriert werden. Dazu können MV2 Loop 1 und Loop 2 miteinander verbunden werden. Zusammen mit der Stellung von MV1 ist das System geschlossen Abb. 3.3 (b) oder offen Abb. 3.3 (c). Im offenen System gelangt eine Teilmenge der Eingangsluft in die Referenzzelle des differentiell messenden IRGA2. Die Hauptmenge der Eingangsluft wird in die Blattkammer geleitet. Die aus der Blattkammer austretende Luft wird mit der zweiten Messzelle des IRGA2 analysiert und danach nicht wieder in die Anlage zurückgeführt. Das Messverfahren des offenen Systems ist in dem Kapitel *Messverfahren bei einem offenen System* (Kapitel 3.2.4) beschrieben.

Bei einem geschlossenen System zirkuliert die zu messende Luft kontinuierlich und mit konstantem Druck durch die Pumpe, Blattkammer und dem absolut messenden IRGA1. Die Grundlagen für das Messprinzip sind in dem Kapitel *Messverfahren bei einem geschlossenen System* (Kapitel 3.2.2) erklärt.

Weitere Informationen und eine ausführliche Beschreibung und die Spezifikationen der Gaswechselanlage sind in der Literatur [29, 33] zu finden.

3.4 Translokationsmessungen

3.4.1 Grundlagen Stofftransport

Die Organisation der höheren Pflanzen ist durch die Gliederung in die drei Grundorgane Wurzel, Sprossachse und Blätter gekennzeichnet [22]. Der Stofftransport zwischen diesen Organen, aber auch innerhalb derselben, verläuft hauptsächlich in speziell entwickelten Ferntransportbahnen, die für einen effektiven Austausch von Wasser, Nährstoffen oder Assimilationsprodukten zwischen Wurzel und Blatt zuständig sind. Die Leitbahn, in der Wasser und Nährstoffe von den Wurzeln zu den oberirdischen Pflanzenteilen transportiert werden, ist das Xylem. Im Gegensatz dazu transpor-

tiert das Phloemgewebe Photosyntheseprodukte aus den ausgewachsenen Blättern zu wachsenden und speichernden Pflanzenteilen [34].

Die Leitbahnen (siehe Abb. 3.4) mit Xylem und Phloem durchziehen die gesamte Pflanze. Das Phloem befindet sich auf der nach außen gewandten Seite der Trans-

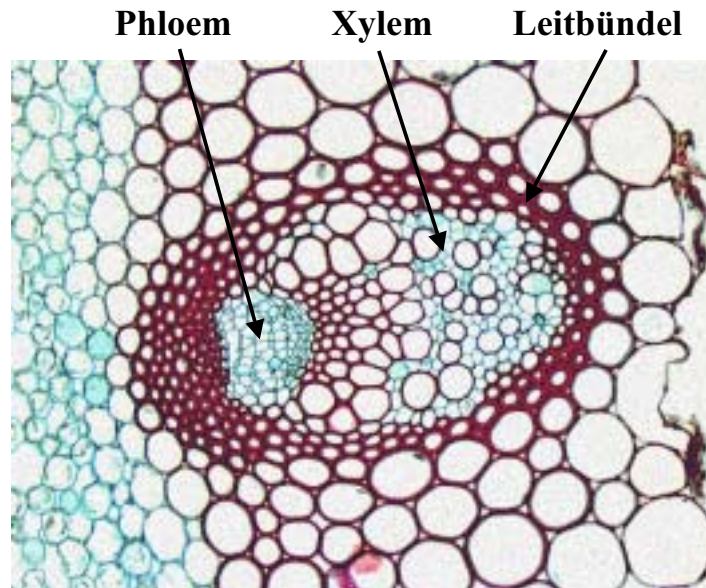


Abbildung 3.4: Querschnittsdarstellung des Leitbündels vom *Ranunculus repens* (dt. Bez. Hahnenfuss), Quelle: [35]

lokationsgewebe und bildet in Bäumen z.B. die Innenseite der Rinde aus. Der Ferntransport der Assimilate findet in den sogenannten Siebelementen statt. Diese walzenförmigen Siebelemente bilden eine Siebröhre mit Siebplatten zwischen den einzelnen Elementen. Diese Siebplatten sind mit Poren versehen und ermöglichen dadurch einen mehr oder weniger ungeordneten Stofftransport durch die Siebröhren. Neben den Siebelementen befinden sich Geleitzellen, die in einem funktionellen Zusammenhang mit den Siebelementen am Ferntransport beteiligt sind. Sie bilden zusammen den Siebelement-Geleitzellen-Komplex [22].

Die Transportrichtung der Assimilate erstreckt sich von den *source*- zu den *sink*-Geweben. Als *source* bezeichnet man jedes exportierende Organ, in der Regel ein ausgewachsenes Blatt, das mehr photosynthetische Assimilate produziert als es selbst

verbraucht. Nicht-photosynthetische Organe der Pflanze, aber auch Organe, die nicht ausreichend Photosyntheseprodukte für eigenes Wachstum erzeugen können, sind auf den Import von organischen Stoffen angewiesen und werden als *sink* bezeichnet. Wurzeln, Knollen, sich entwickelnde Früchte, aber auch noch nicht ausgewachsene Blätter, die Kohlenhydrate benötigen, sind Beispiele für *sink* Gewebe [34].

Die im Phloem translozierten Substanzen sind vor allem Kohlenhydrate. Saccharose ist der am häufigsten in den Siebelementen vorkommende Zucker, daneben findet man auch einige Oligosaccharide wie Raffinose, Stachyose u.a. [19]. Auch andere organische Substanzen werden im Phloem transportiert, so kommt Stickstoff vor allem in Form von Aminosäuren im Phloem vor. Die Konzentrationen an diesen Verbindungen sind jedoch wesentlich geringer als die der Kohlenhydrate. Neben den Assimilaten wird im Phloem ein Vielzahl weiterer Stoffe transportiert: Phytohormone ermöglichen eine Gesamtabstimmung der unterschiedlichen Pflanzenabschnitte aufeinander [19]. Proteine und RNA-Moleküle im Phloemsaft vermitteln eine Art Fernkommunikation [17].

Des weiteren spielt das Phloem eine wichtige Rolle bei der Wechselwirkung der Pflanze mit phytopathogenen Organismen. Einerseits wurden Viren und Bakterien in den Siebelementen gefunden, andererseits werden im Phloem Substanzen transportiert, die zu der sogenannten systemisch aktivierten Resistenz führen. Hier werden von einem befallenen Pflanzenteil Substanzen in befallsfreie Pflanzenteile u.a. via Phloem transportiert, wodurch deren Resistenzniveau erhöht wird [36].

Die Gewinnung und Analyse von Phloemsaft erweist sich als sehr schwierig, da der Saft aus einzelnen Siebelementen entnommen werden müsste. Häufig werden aber bei der Phloemsaftentnahme benachbarte Zellen beschädigt, wodurch die Zusammensetzung der Flüssigkeit verändert wird. Um derartige Phloemsaftverunreinigungen bei der Probenentnahme zu vermeiden, wird der Saft häufig mit Hilfe von Blattläusen (Aphiden) gewonnen. Diese stechen mit ihrem Rüssel in ein einzelnes Siebelement eines Blattes oder eines Blattstiels. Der in den Siebelementen herrschende Turgordruck drückt den Saft in den Verdauungstrakt der Blattlaus. Schneidet man den Rüssel ab,

dann lässt sich ein relativ unveränderter Phloemsaft gewinnen und analysieren [34].

Phloemtransport dient hauptsächlich dem Ferntransport von photosynthetisch gewonnenen Kohlenhydraten. Bevor die organischen Substanzen in den Leitbahnen transloziert werden können, müssen sie zunächst aus den photosynthetisch aktiven Zellen in die Siebelemente gelangen. Dies wird als Phloembeladung bezeichnet. Im ersten Schritt der Phloembeladung fließen Photosyntheseprodukte über einen Kurzstreckentransport in die Nähe der Siebelemente der kleinsten Blattadern. Im zweiten Schritt, der Siebelementbeladung, wird Zucker in die Geleitzellen und Siebelemente aufgenommen. Gelangen diese in die Siebelemente, dann werden sie zu den *sink*-Bereichen exportiert. Dort erfolgt die Entladung der in Phloem transportierten Verbindungen. Die Transportzucker verlassen den Siebzellen-Geleitzellen-Komplex und fließen zu den *sink*-Zellen. Die Phloembeladung an der *source* und die Entladung am *sink* erzeugen dabei die treibende Kraft für die Translokation in den Siebelementen. Der Mechanismus dieses Transportes wird mit Hilfe des Druckstrom-Modells erklärt [34]. Das Modell besagt, dass eine osmotisch erzeugte Druckdifferenz die treibende Kraft für den Fluss in den Siebelementen ist.

Die Phloembeladung, d.h. der Transfer von Photoassimilaten in die Siebelemente an der *source*, ist energiegetrieben. Auf diese Weise kommt es im *source* Organ zu einer hohen Konzentration osmotisch aktiver Verbindungen in den Siebelementen. Dies führt zu einem Einstrom von Wasser aus den benachbarten Zellen und erzeugt einen hohen Turgordruck. Am anderen Ende des Translokationsweges kommt es aufgrund der (aktiven) Entladung zu einer niedrigen osmotischen Stoffkonzentration in den Siebelementen des *sink*. Diese führt zu einem Wasseraustritt aus den Siebelementen in die benachbarten Zellen. Aufgrund dieser Mechanismen wird Wasser mit den darin gelösten Stoffen (Assimilaten) in einer Massenströmung somit von Orten mit hohem Druck (*source*) zu Orten mit niedrigem Druck (*sink*) transportiert [18].

Die Flussgeschwindigkeiten im Phloem können dabei beträchtliche Ausmaße erreichen zwischen 0.3 und 1.5 m h^{-1} [34]. Derartige Flussgeschwindigkeiten werden häufig mit Hilfe radioaktiv markierter Substanzen gemessen. Bei solchen Experimenten wird

radioaktiv markiertes CO_2 für kurze Zeit an einem *source* Blatt (siehe Abb. 3.5) appliziert (Puls-Markierung) und das Auftreten dieser Substanz im *sink*-Gewebe oder an einen bestimmten Ort entlang des Translokationsweges mit geeigneten Detektoren gemessen.

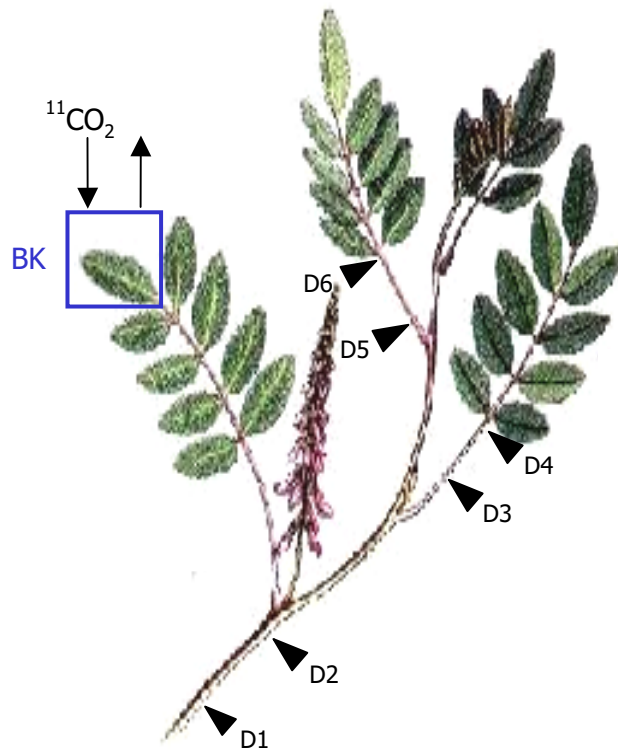


Abbildung 3.5: Versuchsaufbau für Translokationsmessungen, **BK:** Blattkammer, **D1..D6:** Detektoren

Zu diesen radioaktiven Markierungssubstanzen gehören die Kohlenstoff Isotope ^{14}C ($t_{1/2} = 5730$ Jahre) und ^{11}C ($t_{1/2} = 20,4$ min). Untersuchungen mit ^{14}C - CO_2 werden aufgrund der deutlich höheren Halbwertszeit sowie die Energie der emittierten Elektronen (β -Teilchen, $E = 158$ KeV) bei ^{14}C niedrig ist gegenüber ^{11}C , wird diese Methode als destruktiv bezeichnet [19]. Bei der Puls-Markierung wird dem *source*-Gewebe $^{14}\text{CO}_2$ angeboten, das anschließend metabolisiert wird und als Assimilat in den Translokationsweg gelangt. Die untersuchte Pflanze wird nach einer festgelegten Zeit in kleine Proben zerteilt, um das räumliche Verteilungsprofil der mit ^{14}C markierten Substanzen zu bestimmen.

Die Anwendung von ^{11}C markiertem CO_2 ist dagegen eine nicht destruktive Methode, da die nach Positronen-Emission entstehenden γ -Quanten ("Bremsstrahlung" mit $E = 511 \text{ KeV}$) mit Hilfe von Szintillations-Detektoren an den gewünschten Pflanzenteilen von außen gemessen werden [19].

Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von ^{11}C können diese Versuche an individuellen Pflanzen nach jeweils ca. 3 h beliebig oft wiederholt werden. Der Vorteil dieser Methode besteht also darin, dass z.B. saisonale Translokationsmuster, aber auch Geschwindigkeitsänderungen des Assimilatetransports in Phloem, untersucht werden können [37]. Somit lassen sich mit ^{11}C markierten Assimilaten räumliche und zeitliche Änderungen im Transportverhalten von Pflanzen feststellen [38].

3.4.2 Translokationsmessungen

Für die Durchführung entsprechender Experimente ist das kurzlebige Radioisotop ^{11}C erforderlich, welches als $^{11}\text{CO}_2$ mit Hilfe eines Kompakt-Cyclotron (CV-28) im Radiologischen Zentrum der Universität Duisburg-Essen hergestellt wird. Die Produktion des Radioisotop ist in der Literatur [39] erläutert.

In einem Experiment mit ^{11}C markiertem CO_2 wird das $^{11}\text{CO}_2$ in der Regel in ein geschlossenes Gaswechselsystem injiziert (vgl. Kapitel 3.2.1). In diesem System ist ein *source* Teil einer Pflanze - meistens ein ausgewachsenes Blatt - eingespannt. Das $^{11}\text{CO}_2$ wird von der Pflanze aufgenommen und in die Photoassimilate eingebaut, die dadurch radioaktiv markiert werden. Diese markierten Assimilate werden zusammen mit den unmarkierten über die Leitbahnen des Phloem in die weiteren Grundorgane der Pflanze transportiert.

Mit geeigneten Detektoren und Auswerteelektronik (siehe Abb. 3.6) kann der Transport der ^{11}C markierten Assimilate gemessen werden. Als Detektor für den Nachweis der γ -Strahlung (bis $E = 960 \text{ KeV}$) werden Szintillationskristalle z.B. NaJ oder BGO eingesetzt [39]. In solchen Detektoren erzeugt der Einfall eines geladenen Teilchens oder eines γ -Quant ein dem Energieverlust entsprechenden Lichtblitz

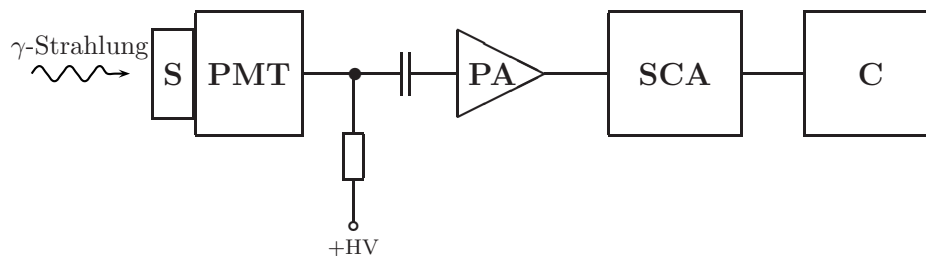


Abbildung 3.6: Stark vereinfachte Darstellung der Auswerteelektronik für die Translokationsmessungen, **S:** Szintillatorkristall, **PMT:** Photomultiplier mit Photokathode, **PA:** Verstärker, **SCA:** Einzelkanalanalysator, **C:** Counter/Timer

(Photonen) [40]. Die Registrierung dieser Photonen erfolgt durch Photoeffekt an der Kathode des Photomultipliers. Die an der Photokathode erzeugten Photoelektronen werden durch den Photomultiplier verstärkt (Verstärkung typ. 10^7) [41]. Das Ausgangssignal - Anode des Photomultipliers - wird für eine weite Verarbeitung mit dem Einzelkanalanalysator angepasst. Die standardisierten Ausgangsimpulse des Einzelkanalanalysators werden mit Hilfe des nachgeschalteten Zählers über ein definiertes Zeitfenster summiert. Für die Analyse der Messdaten erforderlichen Methoden sind in der Literatur erörtert [39].

3.5 Sensoren und Aktoren für das GT_{PROZESSAS}

In diesem Kapitel wurden die pflanzenphysiologischen Messmethoden aufgezeigt. Dabei ist deutlich geworden, dass die Gaswechselanlage für eine Umsetzung der gaswechselanalytischen Messverfahren und die Translokationsmessungen, in Verbindung mit der Auswertelektronik für die γ -Strahlung, eine wesentliche Grundlage darstellt. Diese Messmethoden bilden auch für das zu konzipierende **GT_{PROZESSAS}** die Basis. Aufgrund dieser Tatsache ist eine Integration der eingesetzten Aktoren (siehe Tabelle 3.1 und 3.2) und Sensoren (siehe Tabelle 3.3 und 3.4) in das **GT_{PROZESSAS}** erforderlich, welche für die Detektion und Steuerung der einzelnen Prozessgrößen notwendig sind.

Die in den Tabellen aufgeführten Aktoren und Sensoren sind dem entsprechenden I/O-Modul des PXI/SCXI-Datenerfassungssystems (siehe Tabelle 6.1) zugeordnet. Das entsprechende Kürzel charakterisiert in der Excel Steuerdatei eindeutig den I/O-Kanal.

I/O-Modul SCXI-1124 (Aktoren/Regler)			
Kanal	Kürzel	Bezeichnung	Funktion im GT _{PROZESSAS}
0	MFC-01	Mass Flow Controller	Durchfluss CO ₂ -freie Luft
1	MFC-02	Mass Flow Controller	Durchfluss CO ₂
2			
3	FM1-set	Sipart Regler 1	Durchfluss im System
4	Pd1-set	Sipart Regler 1	Druck in der Blattkammer
5	CG-set	Sipart Regler 1	CO ₂ -Dosierung über V50

Tabelle 3.1: Aktoren und Regler für das **GT_{PROZESSAS}**

Zusätzlich werden Massendurchflussmesser und -regler (siehe Abb. 3.5) des Herstellers Bronkhorst eingesetzt. Sowohl die Messgeräte wie auch die Regler werden über einen Feldbus RS-485 untereinander verbunden und können über einen entsprechenden Controller mit dem Host-System über die RS-232 Schnittstelle kommunizieren.

I/O-Modul SCXI-1163 (Aktoren)			
Kanal	Kürzel	Bezeichnung	Funktion im GTPROZESSAS
0	V1	Magnetventil	Eingang Stickstoff
1	V2	Magnetventil	Eingang CO ₂ -freie Luft
2	V3	Magnetventil	Eingang Sauerstoff
3	V4	Magnetventil	Eingang CO ₂
4			
5	V6	Magnetventil	Eingang Prüfgas
6	V7	Magnetventil	Eingang Prüfgas
7	V8+GP5	Magnetventil/Gaspumpe	Gasversorgung der Referenzseite
8			
9			
10	MV1	Mehrwegeventil	Umschaltung Luft/Gasmischung
11	MV2	Mehrwegeventil	Umschaltung auf Absorber 1
12	MV3	Mehrwegeventil	Umschalter auf Dreyer 1
13	MV4.1	Verteilerventil	Stickstoff
14	MV4.2	Verteilerventil	Luft/Gasmischung Line 2
15	MV4.3	Verteilerventil	Gasmischung/Luft Line 1
16			
17	MV5	Mehrwegeventil	öffnet/schließt das System
18	MV6	Mehrwegeventil	öffnet/schließt ¹¹ C-Bypass
19	MV7.1	Verteilerventil	Ausgang
20	MV7.2	Verteilerventil	Ausgang Absorber 2
21	MV7.3	Verteilerventil	Ausgang Absorber 3
22	MV10	Verteilerventil	Diff.-Bal.
23	MV12	Verteilerventil	
24	MV13	Verteilerventil	
25	MV15	Verteilerventil	
26	CG-0/1	Sipart Regler 5	24 V für CO ₂ -Regelung
27	FG-0/1	Gebläse Klimakammer	Frischluft
28	AG-0/1	Absorber Klimakammer	CO ₂ -Absorption
29			
30			
31			

Tabelle 3.2: Diskrete Aktoren für das GTPROZESSAS

I/O-Modul SCXI-1100 (Sensoren)				
Kanal	Kürzel	Typ	Bezeichnung	Funktion im GT _{PROZESSAS}
0	Ce1	D	Binos 4.1	CO ₂ absolut im geschlossenen System
1	Ce2	D	Binos 4.11	CO ₂ absolut im geschlossenen System
2	Cd	D	Binos 100	CO ₂ Differenz im geschlossenen System
3				
4	he	G	Vaisala HMP130 Y	Feuchte relativ vor Blattkammer
5	ho	G	Vaisala HMP130 Y	Feuchte relativ hinter Blattkammer
6	te	G	Vaisala HMP130 Y	Temperatur von he (Eingang)
7	to	G	Vaisala HMP130 Y	Temperatur von ho (Ausgang)
8				
9				
10				
11				
12				
13	FM1	MFM	Tylan FM 360	Durchflussrate im System
14				
15	Pa1	D	Honeywell 142PC15AL	Luftdruck (Atmosphäre)
16				
17	Pd1	D	Honeywell 142PC15AL	Differenzdruck Blattkammer/Atmosphäre
18				
19				
20	tKK	G	Stankowitz hd7-W24S	Temperatur in KK (Schaltschrank)
21	hKK	G	Stankowitz hd7-W24S	Feuchte relativ in KK (Schaltschrank)
22	CG	D	WMA-2(C)	CO ₂ absolut in der Klimakammer (KK)
23	eLC	D	WMA-2(C)	CO ₂ absolut in der externen Blattkammer
24				
25				
26				
27				
28				
29				
30	(he*)			
31	(ho*)			

Tabelle 3.3: Sensoren für das GT_{PROZESSAS}, **D:** Drucksensor, **G:** Gerät mit analogem Ausgang für Temperatur und Feuchte, **MFM:** Mass Flow Meter

I/O Modul SCXI-1112 (Sensoren)				
Kanal	Kürzel	Typ	Bezeichnung	Funktion im GTPROZESSAS
0	tC	T	Ni/CrNi	Temperatur Blattkammer
1	tS	T	Ni/CrNi	Temperatur Blatt
2	tG	T	Ni/CrNi	Temperatur außerhalb Blattkammer
3	tD*	T	Ni/CrNi	Temperatur Taupunkt-Thermostat (DP3)
4	tD5	T	Ni/CrNi	Temperatur Taupunkt-Thermostat (DP5)
5				
6				
7				

Tabelle 3.4: Temperatur-Sensoren für das **GT_{PROZESSAS}**, **T**: Thermoelement

RS-232 (Sensoren/Aktoren)		
Kürzel	Bezeichnung	Funktion im GTPROZESSAS
MFC-11	Mass Flow Meter/Controller F-232M	Durchfluss CO ₂ -freie Luft
MFC-12	Mass Flow Meter/Controller F-232M	Durchfluss CO ₂
MFC-21	Mass Flow Meter/Controller F-200C	Durchfluss CO ₂ -freie Luft
MFC-22	Mass Flow Meter/Controller F-200C	Durchfluss CO ₂

Tabelle 3.5: Sensoren und Aktoren mit entsprechender Schnittstelle für eine Kommunikations über die RS-232

4 Anforderungen an das **GTPROZESSAS**

Im Kapitel 2 wurde der Ist-Zustand des bisher eingesetzten Messsystems charakterisiert sowie die Defizite aufgezeigt. Dabei ist deutlich geworden, dass die dabei eingesetzte Technologie keine Grundlage für ein neues Mess- oder Automatisierungssystem sein kann.

Aufgrund dieser Tatsache entwickelte sich die Grundidee für den Entwurf eines **GTPROZESSAS** (siehe Abb. 4.1), welches die Defizite des alten Systems kompensiert sowie die Anforderungen aus den neuen wissenschaftlichen Fragestellungen berücksichtigt. Dazu beinhaltet das zukünftige Softwaresystem des **GTPROZESSAS** die Gaswechsel- und Translokationsmessungen, ein bildgebendes Messverfahren und die Steuerung der pflanzenphysiologischen Prozesse. Die Vorteile dieser Integration sind u.a., dass eine korrelierte *online* Analyse der Messdaten aus den einzelnen Messsystemen, eine Synchronisierung der einzelnen Messsysteme aber auch eine Kommunikation zwischen den Rechenprozessen gegeben ist.

Als zentraler Punkt ist die Steuerung der pflanzenphysiologischen Prozesse zu sehen. Die Idee dabei ist, mit Hilfe einer Steuerdatei und einer programmierbaren Steuerung die äußeren Parameter der Gaswechsel- und Translokationsprozesse beeinflussen zu können aber auch Parameter des Messsystems (Speicherintervall der Datenarchivierung, Integrationszeit Bilderfassung u.a.) zu modifizieren. Dieses beinhaltet ein Vielzahl von Vorteilen gerade in Bezug auf eine flexible Erstellung und Durchführung von komplexen wissenschaftlichen Experimenten aus dem Bereich der

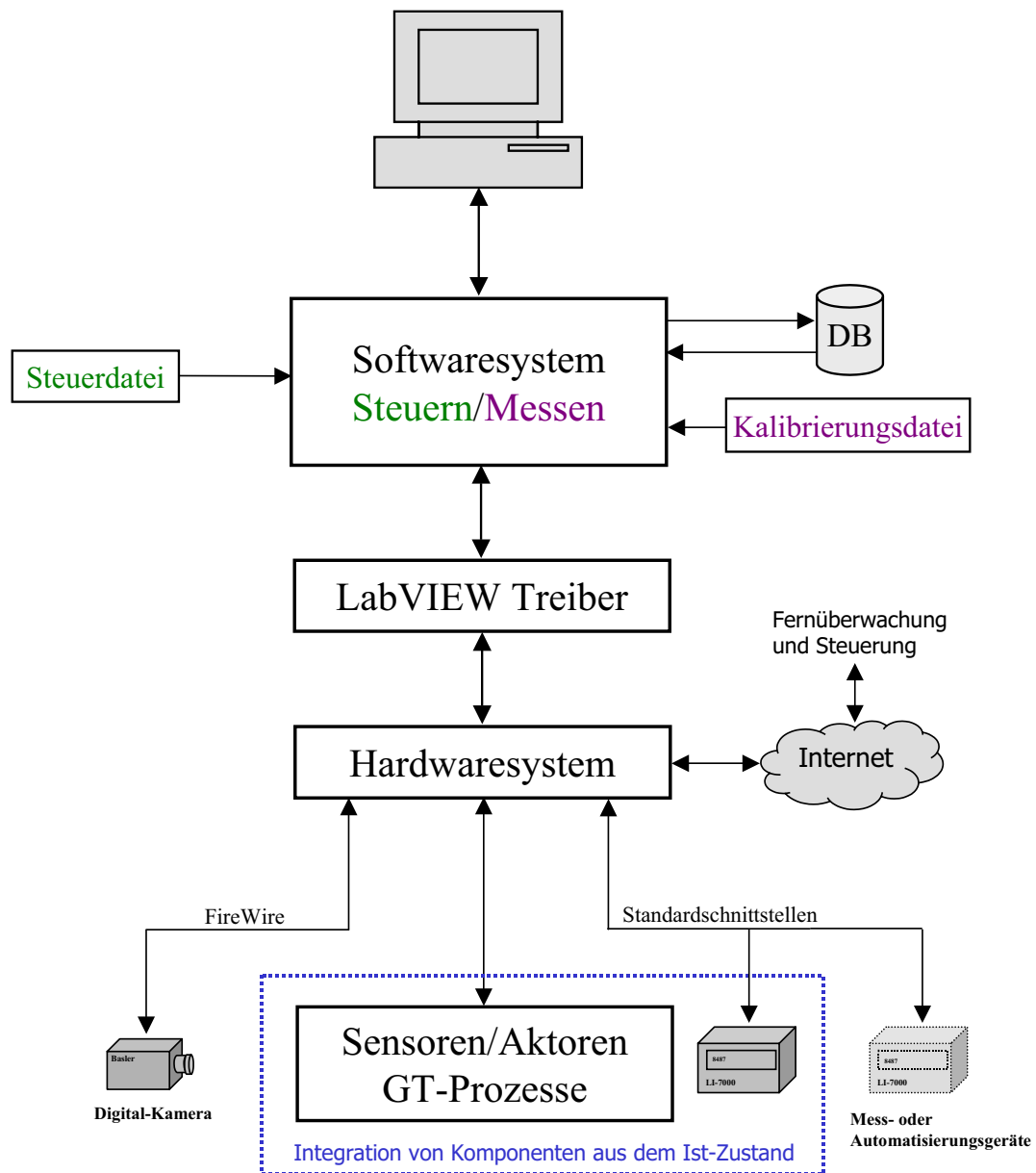


Abbildung 4.1: Grundidee für den Entwurf des GT_{PROZESSAS}

In Analogie zu der Steuerdatei für die Beeinflussung der Prozesse soll für das Messsystem eine entsprechende Datei für die Kalibrierung der einzelnen Sensoren importiert werden. Für den Anwender ergibt sich aus dieser Vorgehensweise die Möglichkeit, sein Messsystem neu zu konfigurieren ohne Eingriff in die Anwendersoftware. Dieses erhöht zugleich die Flexibilität hinsichtlich des Einsatzes unterschiedlicher Sensoren.

Für eine effektive Erstellung der komplexen Anwendersoftware soll als Entwicklungsumgebung LabVIEW eingesetzt werden. Die modular aufgebaute Architektur der Entwicklungsumgebung ermöglicht, eine große Anzahl von Zusatzmodulen und spezielle Tools zu integrieren und für eine Entwicklung der Applikation zu nutzen. Aber nicht nur zur Erstellung der Applikation kann LabVIEW eingesetzt werden, sondern durch die vorhandene Treiberstruktur ist eine schnelle Integration von unterschiedlichen Hardwarekomponenten, aus dem Bereich der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, gegeben. Dieses beinhaltet u.a. diskrete- und analoge Ein- Ausgabekanäle, Geräte, welche über standardisierte, multifunktionale Schnittstellen kommunizieren können sowie entsprechende Schnittstellen für Win32 Anwendungen. Diese Aspekte sollen für das **GTPROZESSAS** genutzt werden.

Aufbauend auf dieser Grundidee soll ein Konzept für das **GTPROZESSAS** entwickelt werden. Dazu wird zunächst ein Kriterienkatalog erstellt, der den aktuellen Technologien entsprechend einzuhalten ist, um einen Fortschritt bei dem Einsatz des **GTPROZESSAS** zu erlangen. Es wird mit Anforderungen begonnen, die sich auf den allgemeinen Aufbau beziehen. Danach werden die funktionalen Anforderungen an die Automation für die Steuerung der Gaswechsel- und Transportprozesse sowie an das Messsystem gestellt.

4.1 Allgemeine Anforderungen

Die allgemeinen Anforderungen an das **GTPROZESSAS** sollen weniger die abzubildende Funktionalität berücksichtigen, es soll vielmehr sichergestellt werden, dass das **GTPROZESSAS** dem Anspruch gerecht wird, in diesem wissenschaftlichen Bereich universell einsetzbar zu sein. Dazu gehören:

- *Struktur*
- *Modularer Aufbau*
- *Erweiterbarkeit*

Struktur

Durch die umfangreichen und komplexen Automatisierungsfunktionen - diese beinhalten u.a. messen, steuern und regeln der Prozessgrößen, Prozessüberwachung, Prozessauswertung - die durch das **GTPROZESSAS** auszuführen sind, ist sicherzustellen, dass eine Strukturierung in einzelne, durch die Funktionen definierte Teilsysteme erfolgt. Diese Vorgehensweise erhöht die Transparenz des Gesamtsystems und ermöglicht, das **GTPROZESSAS** den jeweiligen Erfordernissen flexibel anzupassen. Dazu sind u.a. die Module für die Steuerung der einzelnen Prozesse deutlich von den Modulen für das Messsystem zu unterscheiden.

Modularer Aufbau

Das **GTPROZESSAS** muß einen modularen Aufbau besitzen, um entsprechend seines Einsatzes konfigurierbar zu sein. Dabei ist die Modularität differenziert zu betrachten für den Hard- und Softwarebereich. Die Modularität im Hardwarebereich muß sicherstellen, dass bei Bedarf einzelne Module ersetzt, aufgerüstet oder vorhandene auf den aktuellen Stand der Technologie angepasst werden können. Eine Zielsetzung dabei ist sicherlich auch, die Ausfallzeiten des **GTPROZESSAS** zu minimieren.

Die Module im Softwarebereich müssen Funktionsgruppen abbilden. Dazu ist unter dem Begriff Funktionsgruppe ein binärer, wiederverwendbarer Softwareteil zu

verstehen, der unabhängig oder zusammen mit weiteren Teilen eine gesamte Softwareapplikation ausmachen kann.

Erweiterbarkeit

Die Erweiterbarkeit des **GTPROZESSAS** sei als einer der wichtigsten Punkte der allgemeinen Anforderungen genannt. Gerade weil der Einsatz dieses Systems im Forschungsbereich liegt, wo nicht in einem eng abgegrenzten Bereich gearbeitet wird, sondern sich durch die wissenschaftlichen Anforderungen ständig ändernde Fragestellungen ergeben, muß das **GTPROZESSAS** nicht nur flexibel eingesetzt, sondern auch genauso flexibel erweitert werden können.

4.2 Funktionale Anforderungen

In dem Kapitel *Allgemeine Anforderungen* wurde auf die Anforderung an die Struktur des Gesamtsystems eingegangen. Diese soll sich in Bezug auf die abzubildenden Funktionalitäten des **GTPROZESSAS** eindeutig differenzieren. Aus diesem Aspekt ergeben sich die zwei Basismodule: Steuerung der pflanzenphysiologischen Prozesse und das Messsystem. Im weiteren wird ausführlich auf die funktionalen Kriterien, welche an diese Module gestellt werden, eingegangen.

4.2.1 Anforderungen an die Steuerung der pflanzenphysiologischen Prozesse

Wissenschaftliche Experimente im Bereich der Pflanzenphysiologie charakterisieren sich durch komplexe und zeitaufwendige Versuchsabläufe von wenigen Stunden bis mehreren Tagen. Für die Steuerung des Versuchsablaufes dieser Experimente müssen eine Vielzahl von Prozessgrößen parallel oder sequentiell, zeitsignifikant und spezifisch für den Versuchsablauf gesteuert werden. In Abb. 4.2 ist dieses exemplarisch für ein typisches Experiment aus dem Bereich der Gaswechsellmessungen dargestellt.

Bei diesem Experiment müssen in dem Zeitraum von t_0 bis t_n ein Vielzahl von unterschiedlichen Ereignissen ausgeführt werden.

Sicherlich kann versucht werden, mit Hilfe einer manuellen Steuerung den Anforderungen an den Versuchsablauf gerecht zu werden. Dieses würde jedoch bedeuten, dass eine ständige Interaktion durch den Anwender notwendig ist, um die Prozessgrößen zu beeinflussen. Gerade die daraus resultierenden Konsequenzen in Bezug auf Reproduzierbarkeit des Experiments, die Flexibilität und der zeitliche begrenz-

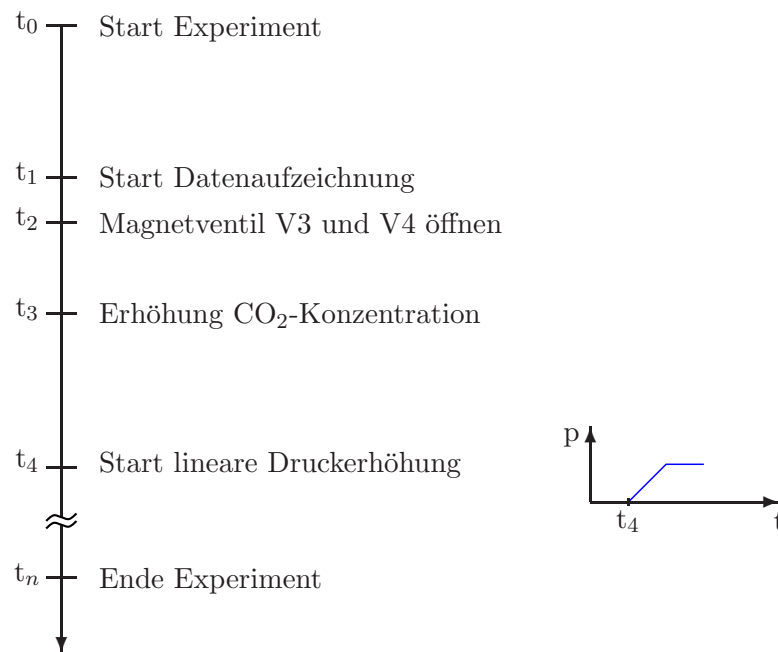


Abbildung 4.2: Typischer Versuchsablauf für ein wissenschaftliches Experiment aus dem Bereich der Pflanzenphysiologie

te Rahmen für die Versuchsdurchführung sowie die mit der manuellen Steuerung verbundenen funktionalen Einschränkungen sind für die neuen wissenschaftlichen Fragestellungen aus dem Forschungsvorhaben nicht mehr akzeptabel. Aus diesen Gründen definiert sich die zentrale Aufgabe an die Steuerung der pflanzenphysiologischen Prozesse: Komplizierte, reproduzierbare wissenschaftliche Experimente über eine spezielle Steuerdatei und einer programmierbaren Steuerung zu beeinflussen. Eine manuelle Steuerung des Experiments über eine Benutzeroberfläche ist dabei

nur als Ergänzung zu sehen, z.B. für eine Fehlerdiagnose, Kalibrierung der einzelnen Komponenten des Gesamtsystems oder zur Organisation eines Testlaufs, bevor das eigentliche Experiment startet.

Für die Umsetzung dieser Anforderungen ist eine spezielle Steuerdatei zu entwickeln, womit der Anwender die Durchführung seines Experiments im Vorfeld planen und mit Hilfe der programmierbaren Steuerung umsetzen kann. Die programmierbare Steuerung ist dabei als unabhängiges Modul zu betrachten, ohne Eingriffsmöglichkeit in den Softwarebereich. Durch diese Vorgehensweise wird gleichzeitig eine Optimierung bezüglich des Einsatzes des **GTPROZESSAS** erzielt, da keine Einarbeitung in die Anwendersoftware notwendig ist und die Versuchsdurchführung unabhängig von der Applikation und reproduzierbar entwickelt werden kann. Für die unterschiedlichen Forschungsvorhaben eröffnet sich aus dieser Vorgehensweise erst die Möglichkeit, Experimente durchzuführen, die auf einem breiten Spektrum wissenschaftlicher Fragestellungen basieren.

Bei der Umsetzung der zu konzipierenden Steuerdatei sind die spezifischen Eigenschaften bei der Versuchsdurchführung im Bereich der Pflanzenphysiologie zu berücksichtigen, die sich aus den unterschiedlichen wissenschaftlichen Forschungsvorhaben ergeben. Diese Anforderungen an die Versuchsdurchführung lassen sich in die folgenden Bereiche aufteilen:

- *Modularität und Erweiterbarkeit*
- *Steuerung der Prozessgrößen*
- *Kommunikation mit dem Messsystem*
- *Steuerung der Experimente*

Modularität und Erweiterbarkeit

Damit eine Automatisierung der Versuchsdurchführung auch effektiv auf neue Experimente transformiert werden kann, soll die konzipierte Steuerdatei modular aufgebaut - bezogen auf die Einzelfunktionen - und flexibel erweiterbar - bezogen auf die Struktur - sein. Diese Modularität und Erweiterbarkeit seien als der wichtigste

Punkt für die konzeptionelle Grundlage genannt.

Steuerung der Prozessgrößen

Grundlegend muß sichergestellt werden, dass sich mit Hilfe der Steuerdatei und der programmierbaren Steuerung alle Prozessgrößen selektiv beeinflussen lassen. Diese Prozessgrößen sollen zusätzlich entsprechenden spezifizierten Parametern zugeordnet werden. Damit besteht die Möglichkeit, den Prozess direkt zu beeinflussen und das Experiment flexibel zu steuern.

Kommunikation mit dem Messsystem

Da die Softwarestruktur des **GTPROZESSAS** modular aufgebaut wird, ist eine Kommunikation zwischen den Prozessen des Messsystems und der Steuerung erforderlich. Damit soll sichergestellt werden, dass ein Austausch von Daten zwischen den parallel ablaufenden Prozessen möglich ist. Dazu ist eine geeignete Schnittstelle zu definieren, welche den Informationsaustausch steuert.

Steuerung der Experimente

Für die Versuchsdurchführung ist eine programmierbare Ablaufsteuerung erforderlich, mit welcher der Anwender in der Lage ist, sein Experiment zeitsignifikant und/oder mit entsprechenden Bedingungen auszuführen. Bedingungen definieren sich als komplexe Abfragen oder als Verknüpfungen der Prozessgrößen.

4.2.2 Anforderungen an das Messsystem

Allgemeine Anforderungen

Neben dem Modul für die Steuerung der pflanzenphysiologischen Prozesse besitzt das Messsystem eine wichtige Stellung im **GTPROZESSAS**. Zentrale Aufgabe dieses Moduls ist die Erfassung, Analyse, Präsentation und Archivierung der physikalischen Prozessgrößen von Gaswechsel-, Translokationsprozessen und dem bildgebenden Messverfahren. Dabei ist sicherlich bei der Konzeption der Erfassung und Analyse der Messdaten eine große Bedeutung zuzuordnen, da die Präsentation (über Graph- und Chart-Darstellung) und Archivierung (filebasierte Datenbank) auf grundlegenden Funktionen basieren und nur funktional in das Messsystem integriert werden. Die allgemeinen Anforderungen strukturieren sich in die Bereiche:

- *Aufbau des Messsystems*
- *Erfassung der Messdaten*
- *Analyse der Messdaten*
- *Integration der pflanzenphysiologischen Messmethoden*

Aufbau des Messsystems

Grundlegend soll das Messsystem so aufgebaut werden, dass der Anwender die einzelnen pflanzenphysiologischen Prozesse und das bildgebende Verfahren selektiv auswählen und in ihren Anteilen flexibel kombinieren kann. Dabei ist sicherzustellen, dass bei allen Kombinationen eine synchrone und periodische Messdatenerfassung gewährleistet ist.

Erfassung der Messdaten

Die Programme für die Messwerterfassung müssen so aufgebaut werden, dass der Einsatz als unabhängiges Einzelprogramm - Modul - möglich ist, aber gleichzeitig auch in das **GTPROZESSAS** zu integrieren sind. Dadurch besteht die Möglichkeit,

die komplexen Programme selektiv zu testen, die einzelnen Bestandteile der Anlage zu überprüfen, einzustellen oder zu kalibrieren. Damit soll das **GTPROZESSAS** für konkrete Experimente anzupassen und auch für zukünftige Fragestellungen leicht zu modifizieren sein.

Die Messdatenerfassung muß sicherstellen, dass eine periodische - bezogen auf das Modul - und eine synchrone - bezogen auf die weiteren Module - Messdatenerfassung gewährleistet ist. Dabei ist neben der zeitsignifikanten Erfassung auch eine Optimierung bezüglich einer minimalen Prozessorzeit notwendig. Dieses ist deshalb ein wichtiger Punkt, da bei der Bildverarbeitung mit rechenintensiven Anwendungen bei der Bilddatenanalyse zu rechnen ist.

Analyse der Messdaten

Die Aufgabe der Analyse der Messdaten ist, die einzelnen physikalischen Prozessmesswerte zu kalibrieren (vgl. Kapitel 4.2.3) und die pflanzenphysiologischen Zusammenhänge zu berechnen. Diese Vorgehensweise soll schon während des Versuchsaufbaues für die Interpretation der experimentellen Daten genutzt werden.

Integration der pflanzenphysiologischen Messmethoden

Bei den beiden Prozessen für den Gaswechsel und die Translokation werden spezifische Messmethoden eingesetzt, welche auf den in dem Kapitel *Grundlagen der pflanzenphysiologischen Messmethoden* (Kapitel 3) beschriebenen Prinzipien basieren. Diese Messverfahren sind als die Grundlage für die hier durchgeführten Experimente an Pflanzen anzusehen. Aus diesem Grunde müssen die aufgezeigten Messverfahren angepasst und in das **GTPROZESSAS** integriert werden.

Bei einer Anzahl von wissenschaftlichen Fragestellungen ist es erforderlich, die pflanzenphysiologischen Messverfahren mit einem bildgebenden Messverfahren zu kombinieren. Damit können parallele Informationen in Bezug auf Blattgeometrie, Blattmorphologie und Blattwachstum detektiert werden (siehe Kapitel 4.2.4).

4.2.3 Anforderungen an die Gaswechsel- und Translokationsmessungen

Als Ergänzung zu den allgemeinen Anforderungen an das Messsystem werden im folgenden die spezifischen Anforderungen an die Gaswechsel- und Translokationsmessungen gestellt:

- *Kalibrierung der Prozessgrößenmessungen*
- *Integration von Messkomponenten*

Kalibrierung der Prozessgrößenmessungen

Die Prozessgrößen müssen bezogen auf die physikalischen Einheiten und Maßzahlen kalibriert werden. Dazu ist ein geeignetes Verfahren mit dem Ziel zu entwickeln, die einzelnen Prozessgrößen ohne Eingriff in das Softwaresystem kalibrieren zu können. Diese Vorgehensweise erhöht die Transparenz und erlaubt dem Anwender ein hohes Maß an Flexibilität in Bezug auf die Konfiguration der eingesetzten Sensoren.

Integration von Messkomponenten

Komplexe Messsysteme beinhalten eine Vielzahl unterschiedlicher Messkomponenten (Datenerfassungskarten, I/O-Systeme, Messgeräte uvm.) für die Erfassung der einzelnen Prozessgrößen. Diese Fragmentierung lässt sich nicht immer vermeiden, da für spezifische Anforderungen geeignete Messverfahren/Messgeräte benötigt werden. Durch die Fragmentierung ist es oftmals aufwendig, die Messdaten physikalisch auf eine Plattform zu konzentrieren und sie dann auch noch mit einer geeigneten Applikation zu erfassen bzw. zu analysieren. Für komplexe Experimente in wissenschaftlichen Bereichen ist eine Fragmentierung auf der Ebene der Auswertesoftware nicht akzeptabel.

Aus diesen Gründen ist es bei der Konzeption des **GTPROZESSAS** notwendig, diesen Aspekt auf der Hardware- und Softwareebene von vorne herein zu berücksich-

tigen. Dabei ist die Zielsetzung, ein offenes System zu entwickeln, das eine effektive Integration von Messkomponenten gewährleistet.

4.2.4 Anforderungen an das bildgebende Messverfahren

Neben dem Konzept für die Steuerung der Gaswechsel- und Translokationsmessungen ist die Möglichkeit, ein optisches Messverfahren mit Hilfe der Bilderfassung einzusetzen, als eine wesentliche Erweiterung des **GTPROZESSAS** zu sehen.

Dieses optische Messverfahren wird im ersten Ansatz als Ergänzung zu den Gaswechselmessungen für die Bestimmung der Blattfläche benötigt, da diese als rein rechnerische Größe in die Formel für die Photosyntheserate eingeht. Für zukünftige Experimente soll dieses Messverfahren ausgedehnt werden z.B. auf die Bereiche der Fluoreszenzmessungen oder zur Detektion von Pflanzenwachstum. Daher ist bei der Konzeption zu berücksichtigen, dass im ersten Ansatz dieses Verfahren als Ergänzung zu sehen ist, zu einem späteren Zeitpunkt soll es jedoch auf weitergehende experimentelle Fragestellungen anwendbar und somit als eigenständiges Messverfahren einsetzbar sein.

4.3 Anforderungen an die Entwicklungsumgebung

Der zentrale Punkt zur Realisierung von komplexen Aufgabenstellungen aus dem Bereich Mess- und Automatisierungstechnik ist die Auswahl einer geeigneten Entwicklungsumgebung. Die Grundlage dafür ist das Anforderungsprofil, welches sich aus den *Anforderungen an das GTPROZESSAS* und aus den Erfahrungen im wissenschaftlichen Bereich definiert. Dieses beinhaltet:

- *Integration von physikalischen Schnittstellen*
- *Schnittstelle zwischen Microsoft Windows basierten Applikationen*
- *Betrachtung als einheitliches und geschlossenes Gesamtsystem*

Integration von physikalischen Schnittstellen

Bussysteme gewinnen in der rechnergestützten Mess- und Automatisierungstechnik immer größere Bedeutung. Sie stellen standardisierte physikalische Schnittstellen zur Verfügung, an welchen Komponenten unterschiedlichster Funktionen in beliebigen Konstellationen zusammengeschaltet werden können. Nur so lässt sich ein hoher Grad an Flexibilität und Modularität, wie er heute für Mess- und Automatisierungssysteme gefordert wird, erreichen.

Bei der Entwicklungsumgebung muß sichergestellt werden, dass diese unterschiedlichen standardisierten Schnittstellen (RS-232¹, IEEE 488², IEEE 802.3³, IEEE 1394⁴) durch eine geeignete I/O-Treibersoftware (z.B. VISA⁵-Standard) bedient werden. Damit wird die Voraussetzung geschaffen, dass unterschiedliche Messkomponenten, die diese Standards unterstützen, effektiv in das **GTprozessAS** zu integrieren sind.

¹RS-232: Der RS (Recommended Standard) Standard definiert die spezifischen Leitungen und Signale, die durch serielle Kommunikations-Controller verwendet werden und stellt damit eine einheitliche Grundlage für die Übertragung serieller Daten zwischen unterschiedlichen Geräten dar.

²IEEE 488: Bit-Parallele, Byte-Serielle Kommunikation mit Hilfe eines Bussystems zwischen Geräten aus dem Bereich der Mess- oder Automatisierungstechnik und einem Steuerrechner.

³IEEE 802.3 (Ethernet): Weit verbreitete, herstellerneutrale Vernetzungstechnologie, mit der im lokalen Netzwerk und einem entsprechenden Protokoll definierte Datenraten übertragen werden können.

⁴IEEE 1394 (FireWire): Serielle Schnittstelle mit Datenraten bis 400 Mbit/s, welche im wesentlichen für den Einsatz in der Bildverarbeitung (Digitalkamera) konzipiert ist.

⁵VISA: **V**irtual **I**nstrumentation **S**oftware **A**rchitecture. VISA stellt ein einheitliches, herstellerübergreifendes Fundament für die Entwicklung und Integration von Gerätetreibern dar, die unabhängig vom Messgerätetyp, Bus- oder Betriebssystem sind.

Schnittstelle zwischen Microsoft Windows basierten Applikationen

Flexibilität im Softwarebereich bedeutet heutzutage, über standardisierte Kommunikationsschnittstellen Daten mit weiteren Applikationen auszutauschen, aber auch Funktionen, Methoden und Objekte ferngesteuert aufzurufen und zu manipulieren. Für Windows Applikationen ist z.B. ActiveX⁶ als Standard in diesem Bereich zu nennen. Die Entwicklungsumgebung muß sicherstellen, dass eine Kommunikation zwischen Microsoft Windows basierten Applikationen auf der Softwareebene unterstützt wird.

Betrachtung als einheitliches und geschlossenes Gesamtsystem

Komplexe Anwendungen aus dem Bereich der Mess- und Automatisierungstechnik bestehen aus einer Vielzahl einzelner Messkomponenten. Die Entwicklungsumgebung muss sicherstellen, dass diese nicht fragmentiert, sondern als das zu messende Objekt betrachtet werden.

Die Umsetzung dieser aufgeführten Anforderungen durch die Entwicklungsumgebung ist die Grundlage zur Realisierung des Gesamtsystems und erfüllt die übergeordnete Forderung nach einem flexibel zu konfigurierenden **GTPROZESSAS** auch für zukünftige Forschungsvorhaben. In dem Kapitel *Auswahl der Entwicklungsumgebung* (Kapitel 5) wird ausführlich auf diese Aspekte eingegangen.

⁶ActiveX ist eine von Microsoft konzipierte Standard Schnittstelle, die eine Kommunikation sowie Steuerung zwischen Windows Applikationen ermöglicht und um Dokumente oder Code in anderen Anwendungen zu integrieren.

5 Auswahl der Entwicklungsumgebung

Bei der Konzeption eines komplexen Gesamtsystems aus dem Bereich der Mess- und Automatisierungstechnik ist die Frage, mit welchen Entwicklungswerkzeugen dieses Konzept umgesetzt werden kann, von großer Bedeutung. Diese Entscheidung ist gekoppelt mit dem Kriterienkatalog, der sich aus den Anforderungen an das Gesamtsystem ergibt. Umgekehrt kann sich das eingesetzte Entwicklungswerkzeug auch auf die Konzeption auswirken, indem es z.B. spezielle Tools oder entsprechende Treiber zur Verfügung stellt, welche schon im Vorfeld bei der Konzeption berücksichtigt werden können. Beide Gesichtspunkte sollten daher nicht getrennt, sondern miteinander verknüpft betrachtet werden. Gerade dieser Aspekt ist auch bei der Konzeption des **GTPROZESSAS** berücksichtigt worden. Im weiteren werden die Entscheidungskriterien für den Einsatz von LabVIEW¹ als Entwicklungsumgebung ausführlich diskutiert.

Hinsichtlich der Auswahl einer geeigneten Entwicklungsumgebung zur Lösung von Aufgabenstellungen aus dem Bereich Mess- und Automatisierungstechnik sind für den Entwickler heutzutage eine große Anzahl von textorientierten, objektorientierten Programmiersprachen aber auch grafische Entwicklungswerkzeuge verfügbar. Die grafische Entwicklungsumgebung LabVIEW besitzt hinsichtlich ihres Einsatzes in der Mess- und Automatisierungstechnik eine Sonderstellung. Mit Recht kann zum

¹LabVIEW: **L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench. LabVIEW ist ein Softwareprodukt von National Instruments, 11500 N Mopac Expwy, Austin TX 78759-3504

heutigen Zeitpunkt gesagt werden, dass sich LabVIEW im Verlauf der letzten Jahre zum Industriestandard [42] in den Bereichen der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik entwickelt hat. Textbasierende Entwicklungswerkzeuge werden immer häufiger in den Bereichen Medizintechnik, Physik, Bildverarbeitung, Kommunikationstechnik oder Signalanalyse durch die grafische Entwicklungsumgebung LabVIEW ersetzt.

Aber nicht nur der erreichte Industriestandard zeichnet LabVIEW aus, sondern die Bandbreite zur Lösung von Aufgabenstellungen aus den Bereichen Mess- und Automatisierungstechnik. Dabei sind vor allem das einfache Programmierkonzept sowie die umfangreichen speziellen Tools und Module zu nennen, die es dem Entwickler erlauben, seine Applikation möglichst effizient zu realisieren [43].

5.1 LabVIEW in der Mess- und Automatisierungstechnik

Zunächst 1986 von Jeff Kodosky konzipiert, hat sich LabVIEW in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und das Konzept der virtuellen Instrumentierung, das sich mittlerweile in vielen Bereichen der Mess- und Automatisierungstechnik etabliert hat, entscheidend geprägt. Mit diesem Konzept ist der Sprung vom konventionellen Messgerät über die PC-gesteuerte Instrumentierung bis hin zu anpassungsfähigen virtuellen Messsystemen gelungen. Damit wurde der Wandel von herstelldefinieren Messgeräten zu anwenderdefinierten Messsystemen vollzogen. Von besonderer Bedeutung für den Anwender hierbei ist, dass seine gesamte Anwendung, bestehend aus vielen einzelnen Messkomponenten, als ein logisch geschlossenes, einheitliches Gesamtsystem erscheint. Mit dieser Art der Abstraktion ist ein wichtiger Schritt zur Überschaubarkeit und Vereinfachung bei der Realisierung von komplexen Aufgabenstellungen gemacht worden.

Unter LabVIEW erstellte Programme werden als Virtuelle Instrumente (VI) bezeichnet. Diese Metapher weist auf den Ursprung der Entwicklungsumgebung in der

Messtechnik hin und erklärt somit die Strukturierung in Frontpanel und Steuerprogramm. Gleich der Frontplatte eines Instrumentes, welche die Bedienelemente trägt und als Schnittstelle zwischen Mensch und Gerät dient, ist das Frontpanel die Bedienoberfläche eines Programms, die es dem Benutzer ermöglicht, mit dem Programm in Interaktion zu treten. Dabei sind die Grenzen von der Nachbildung einer Gerät-Frontplatte bis hin zur komplexen Prozessvisualisierung fließend. Die LabVIEW Umgebung enthält dazu leistungsfähige, auf die Mess- und Automatisierungstechnik zugeschnittene Bibliotheken, die in dem Steuerprogramm, das die eigentliche Funktionalität der VIs bestimmt, Verwendung findet.

Programme unter LabVIEW werden nicht im konventionellen, sequenziellen Textmodus geschrieben, sondern als Blockschaltbild im Sinne einer Datenflussdarstellung mit grafischen Werkzeugen erstellt. Bestandteile dieses Blockschaltbildes können sowohl einfache mathematische Operationen wie Addieren, Multiplizieren oder andere sein, als auch komplexe Funktionen wie zum Beispiel eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) oder selbstdefinierte Unterprogramme. Die Abarbeitung ist rein datenflussorientiert im Unterschied zu den textbasierenden Paradigmen, welche auf Kontrollflussmechanismen aufbauen [44, 45]. Dieser Ansatz ist eine wesentlich elegantere Methode zur Erzeugung paralleler Programmstrukturen. Gerade im Zeitalter der parallelisierenden Strukturen gewährleistet der Datenflussansatz eine leichte Transformation der Applikation auf leistungsfähigen Rechnerarchitekturen lokal oder im Netzwerk.

Ein Compiler erzeugt aus dem grafisch erstellten Blockschaltbild einen optimierten Maschinencode, der bezüglich der Ablaufgeschwindigkeit mit bekannten Textsprachen wie C zu vergleichen ist. Durch diese Ansätze unterscheidet sich LabVIEW deutlich von den anderen Programmiersprachen hinsichtlich Programmerstellung und -abarbeitung [46, 47].

Alternativ kann aber auch mit einer textorientierten Programmiersprache und mit Hilfe von LabWindows/CVI oder dem Measurement Studio die Applikation erstellt werden [43]. Bei LabWindows/CVI handelt es sich um eine auf ANSI-C-basierte Ent-

wicklungsumgebung. Die Integration von Bibliotheken für Datenerfassung, -analyse, -präsentation und -archivierung ermöglicht dem Entwickler, ein Mess- oder Automatisierungssystem individuell zu erstellen. Im Gegensatz dazu wird bei der Verwendung des Measurement Studio die Applikation mit Visual Basic oder Visual C++ erstellt. Für Visual C++ stehen dem Anwender eine Vielzahl messtechnikbasierten C++-Klassen und entsprechende Werkzeuge für die Benutzeroberflächen zur Verfügung. Visual Basic benutzt dagegen definierte ActiveX-Steuerelemente für die Datenerfassung, Gerätesteuerung sowie das Arbeiten im Netzwerk.

5.2 Grafisch oder Textorientiert?

Das Steuerprogramm kann zum einen in einer textorientierten Standard Programmiersprache und mit Hilfe des Measurement Studio oder LabWindows/CVI realisiert werden oder in der grafischen Programmiersprache LabVIEW. Unabhängig von einander bilden alle Umgebungen eine leistungsfähige Basis für die Entwicklungen von kompletten Mess- und Automatisierungssystemen, weil sie einen gemeinsamen Kern von grundlegenden Funktionalitäten unterstützen. Die Entscheidung darüber, welche Programmierphilosophie zum Einsatz kommen soll, muß aufgrund der Aufgabenstellung getroffen werden, die sie zu leisten hat.

Für eine effektive Entwicklung der Applikation stehen dem Entwickler in allen Entwicklungsumgebungen von National Instruments zusätzliche spezielle Tools und Module zur Verfügung. Dabei ist jedoch zu beachten, dass nur bei der grafischen Programmierumgebung LabVIEW das gesamte Spektrum dieser Zusatztools und -module verfügbar ist. Für das Measurement Studio und LabWindows/CVI muß im Einzelfall entschieden werden, ob die dafür verfügbaren Tools und Module zur Lösung der Aufgabenstellung ausreichend sind.

5.3 Fazit

LabVIEW blickt auf mehr als 17 Jahre Erfahrung in der Technik zurück und empfiehlt sich als ausgereiftes, weltweit eingesetztes Software Produkt, dass heutzutage zum Industriestandard im Bereich der Mess- und Automatisierungstechnik zu zählen ist. Durch die modular aufgebaute Architektur der Entwicklungsumgebung ist es möglich, geeignete Zusatzmodule und spezielle Tools zu integrieren und damit die Applikation für einen Einsatz im Bereich PC-gestützter Mess- und Automatisierungssysteme effizient zu entwickeln.

Das Einsatzgebiet umfasst die Instrumentensteuerung, Datenerfassung und -analyse, Bildverarbeitung, Feldbussystemen bis zu den multifunktionalen Schnittstellen im Bereich der Hard- und Software. Die Basis dafür ist eine transparente und offene Integration der Entwicklungsumgebung in die Softwarearchitektur [43] von National Instruments. Durch den grafischen Programmieransatz differenziert sich jedoch LabVIEW deutlich gegenüber den weiteren Entwicklungsumgebungen (C, C++) in Bezug auf die Programmerstellung und -abarbeitung. Gerade aber der datenflussorientierte Ansatz bei der Abarbeitung der Applikation eröffnet eine leichte Verteilung von Software-Modulen auf mehrere Prozessorsysteme lokal oder im Netzwerk.

Die wichtigsten Aspekte bezogen auf die Auswahl von LabVIEW als Entwicklungsumgebung für das Gesamtsystem sind im folgenden zusammengefasst:

- *die offene Softwarestruktur*
- *die schnelle Integration von Hardwarekomponenten in das Gesamtkonzept*
- *die Bandbreite hinsichtlich des Einsatzes zur Lösung von Aufgabenstellungen aus dem Bereich Mess- und Automatisierungstechnik*
- *eine effiziente Entwicklungsumgebung*

Aus den diskutierten Gesichtspunkten ist LabVIEW eine moderne und zukunftsweisende Entwicklungsumgebung, welche die in dem Kapitel *Anforderungen an die*

Entwicklungsumgebung (Kapitel 4.3) aufgeführten Aspekte beinhaltet und sich damit für das **GTPROZESSAS** anbietet.

6 Konzept des **GT**PROZESSAS

In dem Kapitel *Anforderungen an das GTPROZESSAS* (Kapitel 4) wurden die Anforderungen an die Funktionen, Gestalt und Einsatzmöglichkeiten an das **GT**PROZESSAS gestellt. Im Verlauf dieses Kapitels soll nun ein grundsätzliches Konzept entwickelt werden, was diesen Anforderungen gerecht wird.

6.1 Grundkonzept für das **GT**PROZESSAS

Die primäre Forderung bezüglich des Einsatzes des Systems ist die Automation von Versuchsdurchführungen bei Gaswechsel- und Translokations-Experimenten. Dies bedeutet, dass mit Hilfe einer zu konzipierenden Steuerdatei komplexe wissenschaftliche Experimente geplant und durch das **GT**PROZESSAS ausgeführt werden, ohne dass ein Eingriff in das Softwaresystem erfolgt. Aufgrund der großen Bedeutung sollen diese Forderungen als primäre Grundlage in die Konzeption einfließen.

6.1.1 Struktur

Mit den Anforderungen lässt sich die in Abb. 6.1 dargestellte Grundstruktur bezüglich der Funktionalität des **GT**PROZESSAS entwickeln. Diese Struktur beinhaltet als zentrale Einheit das **GT**PROZESSAS, welches über geeignete Schnittstellen eine Kopplung zu den einzelnen pflanzenphysiologischen Prozessen sowie einen Dialog mit dem Anwender ermöglicht. Durch diese Grundstruktur ist sichergestellt, dass die

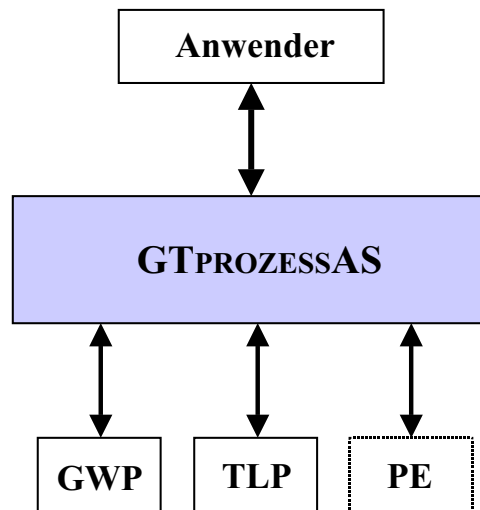


Abbildung 6.1: Entwickelte Grundstruktur aus der Funktionalität des $GT_{PROZESSAS}$,
GWP: Gaswechselprozesse, **TLP:** Translokationsprozesse, **PE:** Prozesserweiterung

physikalischen Prozessgrößen beeinflusst und kontrolliert werden können, Interaktionen durch den Anwender mit dem System möglich sind und die Visualisierung der Prozessgrößen gewährleistet ist.

Aufbauend auf dieser Grundstruktur können die technischen Einrichtungen¹, die für die Umsetzung der Funktionalität erforderlich sind, konkretisiert werden. In Abb. 6.2 ist das dafür entwickelte Grundkonzept für das $GT_{PROZESSAS}$ aufgezeigt. Dabei ist als die wichtigste technische Einrichtung das Automatisierungs-Computersystem zu nennen, mit der zentralen Aufgabe der Ausführung der Automatisierungsfunktionen, zu denen im wesentlichen das Messen, Steuern und Regeln der Prozessgrößen sowie die Prozess-Überwachung zu zählen sind. Für die weitere konzeptionelle Umsetzung dieser Funktionen wird das Automatisierungs-Computersystem in die beiden Bereiche Hardware- (Rechnerhardware und Prozessperipherie) und Softwaresystem (Anwender- und Systemsoftware) aufgeteilt.

Über eine entsprechende Schnittstelle zu den pflanzenphysiologischen Prozessen ist

¹Der Begriff technische Einrichtungen bezeichnet Bestandteile, die für eine Automatisierung erforderlich sind. Die Gesamtheit dieser Einrichtungen wird als Automatisierungssystem bezeichnet.

ein Informationsaustausch bezüglich des Verlaufes und der Steuerung der Prozessgrößen möglich. Dazu erfassen die Sensoren die physikalischen Größen (Temperatur, Druck, Luftfeuchte u.a.) und wandeln sie in elektrische Signale um, welche über entsprechende Messkomponenten dem Automatisierungs-Computersystem für eine weitere Verarbeitung zur Verfügung stehen.

In umgekehrter Richtung werden die vom Rechnersystem gelieferten Signale mit Hilfe entsprechender Einrichtungen an die Aktoren oder Stellglieder (Ventile, Relais u.a.) übermittelt. Mit dieser Schnittstelle ist das Automatisierungs-Computersystem in der Lage, die physikalischen Prozessgrößen zu detektieren und entsprechend zu steuern.

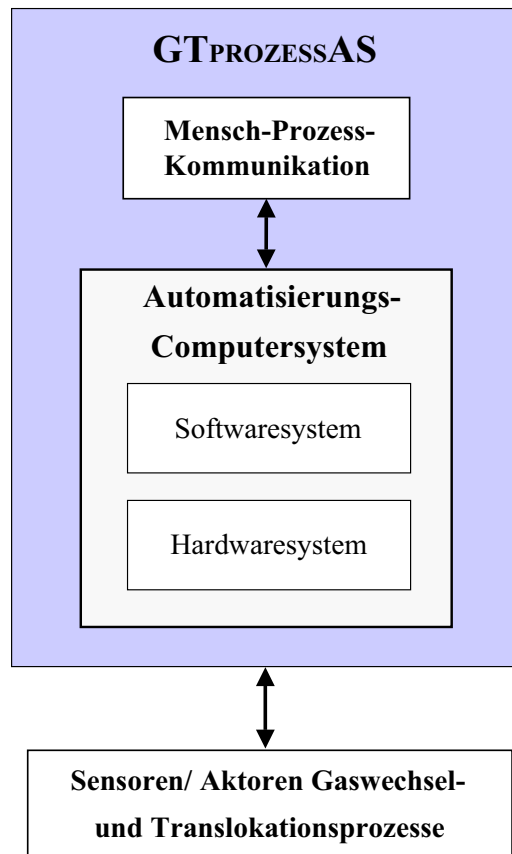


Abbildung 6.2: Blockschaltbild des entwickelten Grundkonzepts für das GT_{PROZESSAS} mit den erforderlichen technischen Einrichtungen

Für den Dialog mit dem Anwender ist eine Schnittstelle konzipiert worden, welche die Möglichkeit einer intuitiven Bedienbarkeit der Steuerung (siehe Kapitel 6.2.2) und eine Präsentation der Prozessgrößen des **GT_{PROZESSAS}** gewährleistet.

Die erweiterte Forderung nach einem modularen Aufbau des **GT_{PROZESSAS}**, bezogen auf das Hard- und Softwaresystem, wurde bereits mehrfach diskutiert. Dies ergibt sich aus sich ändernden wissenschaftlichen Forschungsvorhaben und damit gekoppelten neuen Fragestellungen. Aus diesem Grunde ist diese Forderung von großer Bedeutung und stellt eine wichtige Grundlage für die weitere Konzeption des Hard- und Softwaresystems. Aufgrund dieser Tatsache ist zu definieren, was unter dem Begriff Modularität, bezogen auf das Hard- und Softwaresystem, zu verstehen ist.

Bei Hardwaresystemen ist unter Modularität ein vereinfachtes Konfigurieren, Rekonfigurieren, Integrieren und Reparieren von Systemkomponenten aus dem Bereich der Mess- und Automatisierungstechnik zu verstehen. Die Modularität beinhaltet für Anwender auch, bei Bedarf einzelne Module/Komponenten aufzurüsten, vorhandene dem aktuellen Stand der Technologie anzupassen, ohne das Gesamtsystem ersetzen zu müssen sowie eine deutliche Verbesserung in Bezug auf die Ausfallzeiten des **GT_{PROZESSAS}**. Diese wichtigen Aspekte sind für die Konzeption des Hardwaresystems (siehe Kapitel 6.1.3) speziell bei der Prozessperipherie berücksichtigt worden.

Analoges gilt auch für das Softwaresystem (siehe Kapitel 6.1.6), jedoch ist dabei unter Modularität die Strukturierung der Anwendersoftware in unabhängige Einzelprogramme (Modulen) zu verstehen, welche gleichzeitig integraler Bestandteil des Gesamtsystems sind. Mit diesen Einzelprogrammen lassen sich die komplexen Anwenderprogramme mit Hilfe paralleler Strukturen effizient erstellen und erweitern. Gerade im Zeitalter der Parallelisierung gewährleistet dieser Ansatz eine leichte Verteilung der Aufgaben auf leistungsfähige Mehrprozessorsysteme zur Reduzierung der Programmlaufzeit. Dieser Aspekt ist insbesondere in Bezug auf bildgebende Verfahren und daraus resultierende, rechenintensive Auswertungen bei der Bildanalyse vorteilhaft.

6.1.2 Technische Einrichtungen

In diesem Kapitel wurde die grundlegende Struktur für das **GT_{PROZESSAS}** konzipiert, basierend auf der Funktionalität der Anforderungen. Aus der entwickelten Struktur definieren sich die technischen Einrichtungen für das **GT_{PROZESSAS}**, um den gestellten Anforderungen gerecht zu werden. In der Abb. 6.3 ist eine Gesamtdarstellung dieser strukturell zusammengefasst. In der Übersicht ist auch die weitere Strukturierung des Hard- und Softwaresystems dargestellt, welches erst im weiteren Verlauf der Arbeit diskutiert wird. Dieses soll dem Leser jedoch einen besseren Überblick hinsichtlich der weiteren Konzeption vermitteln, auf welche ausführlich in den folgenden Kapiteln eingegangen wird.

6.1.3 Aufbau des Hardwaresystems

Im letzten Kapitel wurde die Grundstruktur für das **GT_{PROZESSAS}** ausführlich erörtert. Dabei ist die zentrale technische Einrichtung das Automatisierungs-Computersystem, welches sich in das Soft- und Hardwaresystem differenziert (vgl. Abb. 6.3). Die Aufgabe des Hardwaresystems, welches die physikalischen Voraussetzungen zur Verfügung stellt, definiert sich aus den Funktionalitäten an das **GT_{PROZESSAS}**. Dabei ist der wesentliche Aspekt, die Kommunikation mit den Sensoren und Aktoren der Gaswechsel- und Translokationsprozesse sowie eine Interaktion mit dem Anwender zu gewährleisten. Für die Umsetzung dieser Funktionalität sind eine Anzahl von Anforderungen wie modularer Aufbau, Erweiterbarkeit sowie eine schnelle Integration von unterschiedlichen Geräten aus dem Bereich der Mess- und Automatisierungstechnik bei der Konzeption berücksichtigt worden.

Aus diesen Anforderungen ist die Grundstruktur für das in Abb. 6.4 dargestellte Hardwaresystem des **GT_{PROZESSAS}** entwickelt worden. Dieses beinhaltet konkret für die Integration von Einzelgeräten die standardisierten Schnittstellen RS-232/-485, IEEE 488 (IEC), IEEE 1394 (FireWire) und IEEE 802.3 (Ethernet). Damit ist gewährleistet, dass Einzelgeräte aus dem Bereich der Mess- und Automatisie-

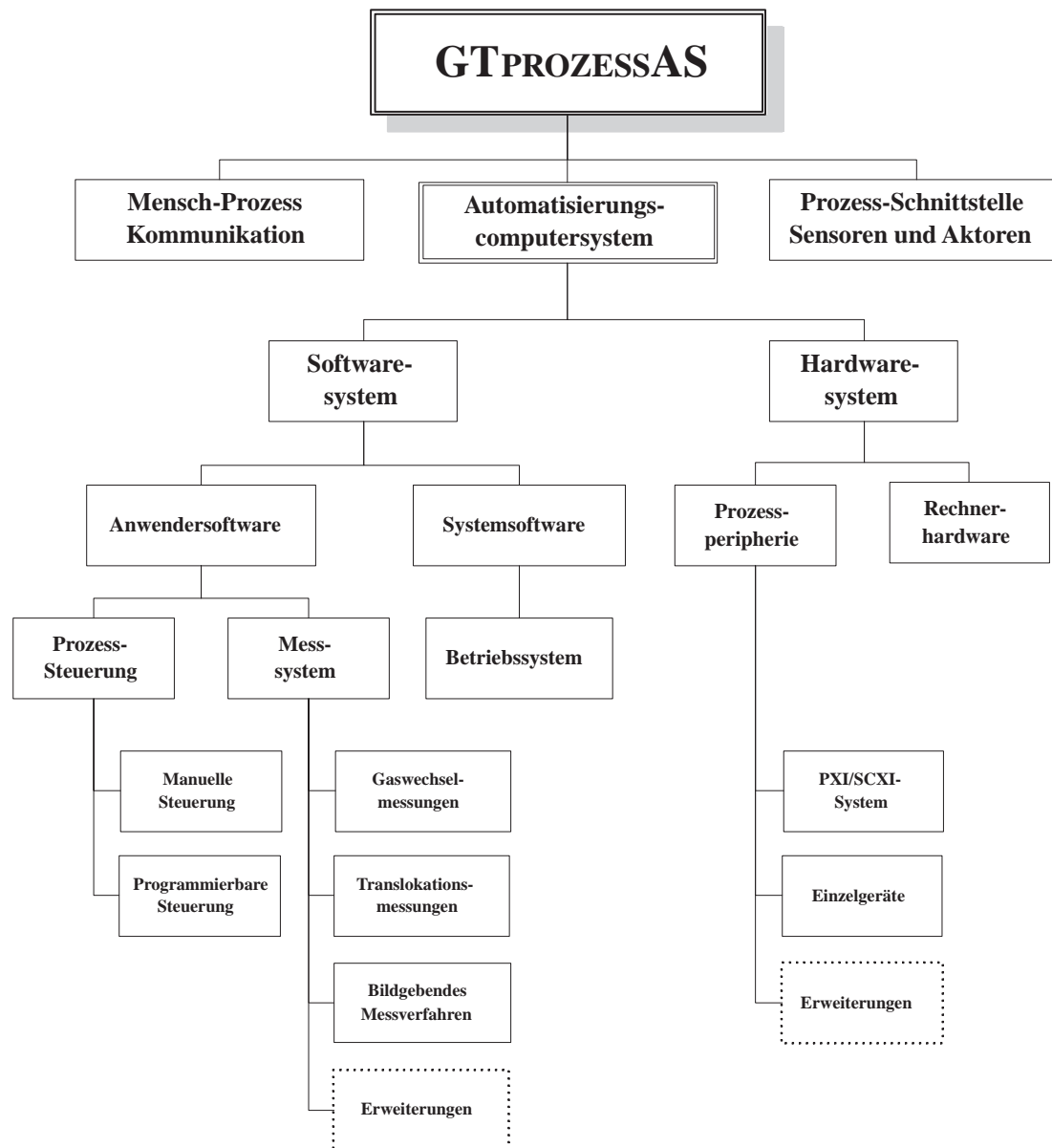


Abbildung 6.3: Strukturelle Gesamtdarstellung der technischen Einrichtungen für das GT_{PROZESSAS}

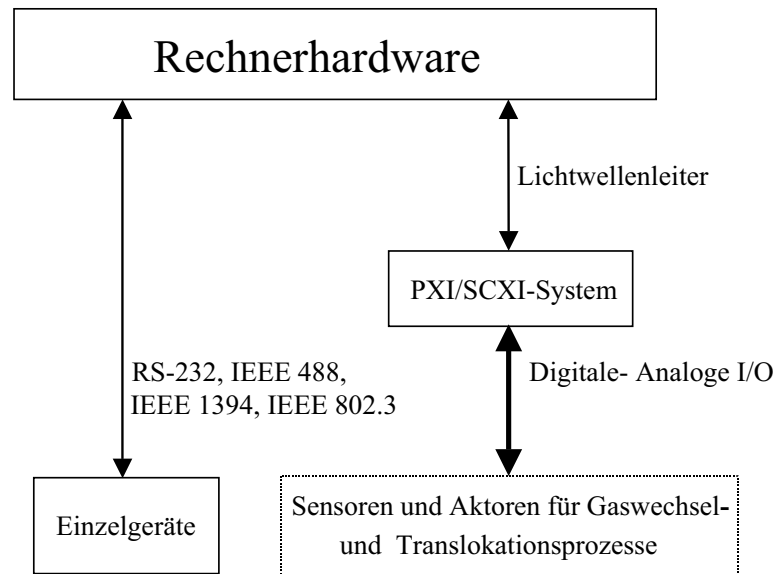


Abbildung 6.4: Konzeptioneller Aufbau des Hardwaresystems für das GT_{PROZESSAS}

rungstechnik (z. B. Infrarot Gasanalysator, Digitalkamera, Regler, Distributed I/O-Systeme usw.) effektiv in ein vorhandenes System integrierbar sind.

Neben den Einzelgeräten ist die zentrale Komponente für die Kommunikation mit den Sensoren und Aktoren ein kombiniertes PXI²/SCXI-³Datenerfassungssystem, welches über eine serielle Datenübertragung und Lichtwellenleiter mit dem Rechnersystem verbunden ist. Aufgrund der Bandbreite dieses Systems wird im weiteren auf die wichtigsten Gesichtspunkte der Konzeption, auf Aspekte der Konfiguration des Datenerfassungssystems sowie auf die Vor- und Nachteile für den Einsatz im GT_{PROZESSAS} eingegangen.

Das PXI-System basiert auf einem Modulträger - dem sogenannten Chassis - und kann mit einer Steuereinheit - dem Controller - sowie unterschiedlichen I/O-Modulen

²PXI: **P**CI **e**Xtension for **I**nstrumentation. Der PXI-Standard basiert auf dem PCI-Bus Konzept wird jedoch mit zusätzlichen Steuerleitungen deutlich in der Funktionalität erweitert.

³SCXI: **S**ignal **C**onditioning **e**Xtension for **I**nstrumentation. Das SCXI-System ist ein Signalkonditionierungssystem in Kombination mit Messwerterfassungskarten oder dem PXI-System.

für den Einsatz im **GT_{PROZESSAS}** kombiniert werden. Die offene standardisierte PXI-Plattform [48] hat viele Vorteile gegenüber weiteren Systemen, da es auf einem industrietauglichen, leicht erweiterbarem Konzept basiert sowie auf dem CompactPCI⁴-Standard aufbaut. Dieser wird um spezielle Trigger- und Synchronisationsmöglichkeiten für die Belange der Mess-, Prüf- und Automatisierungstechnik erweitert. Gerade dieser Gesichtspunkt ist ein wichtiger Aspekt, damit die Möglichkeit der Kommunikation von unterschiedlichen I/O-Modulen besteht. Im **GT_{PROZESSAS}** wird dieses für die Synchronisierung der einzelnen I/O-Module des Messsystems eingesetzt.

Der CompactPCI-Standard selbst wiederum basiert auf dem PCI-Bus-Konzept des Standard-PCs, übertrifft es aber bezüglich der Modularität, Robustheit, Erweiterbarkeit sowie Kompaktheit. PXI und CompactPCI-Module lassen sich innerhalb eines PXI-Systems beliebig kombinieren. Für eine Erweiterung des **GT_{PROZESSAS}** sind heutzutage eine große Anzahl von Controllern mit entsprechenden Schnittstellen und Modulen (Digitalisierer, Funktions-Signalgeneratoren, Digitale I/Os, Bilderfassung und Motorensteuerung usw.) aus dem gesamten Bereich der Mess- und Automatisierungstechnik verfügbar.

Kombiniert wird das PXI-System mit einem Mehrkanal-Signalkonditionierungssystem SCXI. Ausgestattet mit entsprechenden Einsteckkarten und Modulen kann das System für alle Arten der Signalkonditionierung der I/O-Anforderungen konfiguriert werden. Dieses wird im **GT_{PROZESSAS}** für eine Konditionierung von Thermoelementen und analogen Eingangssignalen eingesetzt.

6.1.4 Konfiguration des PXI/SCXI-Datenerfassungssystems

In dem Kapitel *Einsatz des GT_{PROZESSAS}* (Kapitel 8) wird an zwei Beispielen, aus dem Bereich der Gaswechsellmessungen, die Bandbreite für den Einsatz des kon-

⁴PCI: **P**eripheral **C**omponent **I**nterconnect. Eine von Intel eingeführte Spezifikation, die ein lokales Bussystem auf der Basis der PCI-Spezifikation definiert.

zipierten **GT_{PROZESSAS}** aufgezeigt. Dafür ist eine entsprechende Konfigurierung des PXI/SCXI-Datenerfassungssystems - Controller und I/O-Module - erforderlich. Einige Aspekte dazu werden im weiteren diskutiert.

Die grundlegende Funktion des PXI/SCXI-Datenerfassungssystems ist, die Schnittstelle zwischen den Sensoren und Aktoren für die Gaswechsel- und Translokationsprozesse und dem Host-System zu realisieren. Dieses wird mit entsprechenden I/O-Modulen, welche in der Tabelle 6.1 aufgezeigt sind, umgesetzt. Die an diese gestellten funktionalen Anforderungen ergeben sich aus den pflanzenphysiologischen Messverfahren (siehe Kapitel 3) sowie aus den eingesetzten Aktoren, die für eine Steuerung der Prozesse erforderlich sind.

I/O Module	Kanäle	Beschreibung	Funktion
PXI-6031E	64	100kS/s Multifunktions-I/Os	Gaswechselmessungen
PXI-6602	8	Zähler/Timer	Translokationsmessungen
PXI-6602	8	Zähler/Timer	Translokationsmessungen
PXI-6704	8	Analoge Ausgänge	Prozess-Steuerung
SCXI-1112	8	Verstärker für Thermoelemente	Gaswechselmessungen
SCXI-1100	32	Multiplexer/Verstärker	Gaswechselmessungen
SCXI-1124	6	Analoge I/Os	Prozess-Steuerung
SCXI-1163	32	Digitale I/Os	Prozess-Steuerung

Tabelle 6.1: Konfiguration der I/O-Module für das PXI/SCXI-Datenerfassungssystem und deren Funktion im **GT_{PROZESSAS}**

Als Modulträger (PXI-1010) wird dabei ein kombiniertes Datenerfassungssystem eingesetzt, bestehend aus 8 PXI-Slots und 4 SCXI-Signalkonditionierungs-Slots, welches über ein MXI-3 (Multichassis configurations for PXI) Interface (PXI-8335) mit dem Rechnersystem kommuniziert. Die MXI-3 Technologie beruht auf dem Prinzip der Architektur der PCI-zu-PCI Brücke, teilt jedoch die Brücke in zwei Hälften und verbindet sie mit einer seriellen Datenübertragung über Lichtwellenleiter. Aufgrund der hohen Datenrate bis zu 1,5 Gbit/s der seriellen Übertragung ist damit auch die

notwendige Transferrate des PCI-Buses im Gesamtsystem sichergestellt. Der Vorteil gegenüber weiteren Bussystemen ist die potentialfreie Verbindung und die Sicherheit der Datenübertragung bezogen auf äußere Störeinflüsse.

Für eine ausführliche Beschreibung des eingesetzten Controllers und der einzelnen I/O-Module (siehe Tabelle 6.1) sowie deren Spezifikationen wird auf die umfangreiche Literatur von National Instruments verwiesen [49].

6.1.5 Erweiterung des Hardwaresystems für Echtzeitapplikationen

Ein wesentlicher Aspekt hinsichtlich der Erweiterung des **GT_{PROZESSAS}** ist, Applikationen aus dem Bereich der Regelungstechnik in Zusammenhang mit einem Echtzeitbetriebssystem zu kombinieren. Die Zielsetzung dabei ist, unabhängige Regelsysteme für die im Experiment benötigte Klimakammer einzusetzen, wobei gleichzeitig eine Kommunikation mit dem Host-Rechner gegeben sein muß. Die Kommunikation ist erforderlich, da ausgehend von der jeweiligen Aufgabenstellung die Sollwerte der Regler vor oder im Experiment modifiziert werden müssen. Erforderlich ist ggf. auch ein Datalogging der physikalischen Messgrößen im Reglersystem, welche für die auf dem Host-Rechner laufende Applikation als Grundlage einer erweiterten Datenanalyse benötigt werden.

Für diese Applikationen unter Echtzeitbedingungen, bei denen Stabilität und Rechtzeitigkeit gefordert sind, können entsprechende RT (Real Time) Controller (z.B. PXI-RT Controller oder FieldPoint Module von National Instruments) als Embedded Computer Systeme⁵ eingesetzt werden. Durch den Einsatz dieser Controller öffnet sich das **GT_{PROZESSAS}** für eine Erweiterung der Applikation in Bezug auf

⁵Der Begriff Embedded Computer System bezeichnet einen eingebauten Rechner ohne Benutzeroberfläche, aber einem Echtzeit-Betriebssystem. National Instruments integriert in ihren embedded Produkten das Echtzeit-Betriebssystem *Phar Lap Runtime ETS (Embedded Tool Suite) Kernel* von dem Hersteller Venturcom, Inc. 29 Sawyer Road, Waltham, MA 02453.

dedizierte Echtzeitsysteme, aus dem Bereich der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik [50]. Damit kann auf allen Applikationsebenen mit der gleichen Programmiermethodik gearbeitet werden, wie bei Standard LabVIEW Anwendungen [51]. Das bedeutet, die Applikation wird auf einem Standard Windows-PC entwickelt und zur Programmausführung vom Hostrechner kompiliert auf die entsprechende Zielhardware - die RT Controller - heruntergeladen. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die ansonsten zeit- und damit kostenintensiven Schnittstellen zwischen diesen Aufgabengebieten entfallen. LabVIEW-RT [44, 51] verbindet mit diesem Konzept die Mess-, Steuer- und Regelungsanwendungen mit den Vorteilen der Echtzeitfähigkeit.

Für den Einsatz im **GTprozessAS** können vier echtzeitfähige Zielplattformen eingesetzt werden: Die Datenerfassungskarten PCI RT-Serie, PXI-RT Controller, PXI-RT FPGA⁶ basierte Controller und die FieldPoint-20xx-Module. Grundlegend ist für alle genannten Zielplattformen ein autonomes embedded Echtzeit Rechnersystem, auf dem LabVIEW Applikationen unabhängig vom Betriebssystem des Host-Rechners ausgeführt werden. Bis auf die RT-Datenerfassungskarte (PCI-Bus) können alle Controller über das Ethernet oder seriell (RS232) mit dem Host-System kommunizieren. Die Datenerfassungskarten der RT-Serie eignen sich für Anwendungen, bei denen Steuerungskomponenten mit geringem Platzbedarf in ein Windows-basiertes System, als klassische PC-Steckkarte, zu integrieren sind. Diese RT Controller haben jedoch deutliche Nachteile gegenüber anderen Systemen, da keine Erweiterungsmöglichkeiten gegeben sind und die geringe I/O Anzahl und Vielfalt nur einen eingeschränkten Einsatz von Applikationen zulässt.

PXI RT-Controller sind ausgelegt für leistungsstarke Echtzeitanwendungen, die eine enge Synchronisierung einer Vielzahl von I/O-Modulen der Datenerfassung und Signalkonditionierung erfordern. Durch die Möglichkeit der Erweiterbarkeit sind die-

⁶FPGA: **F**ield **P**rogrammable **G**ate **A**rray. Ein FPGA ist ein programmierbarer Schaltkreis, welcher aus vielen identischen Logikblöcken aufgebaut ist. Diese können entsprechend ihrer gewünschten Funktion programmiert und untereinander verbunden werden. Die Funktionalität wird dabei mit einer Hardwarebeschreibungssprache entwickelt oder lässt sich wie in diesem Fall direkt aus dem LabVIEW Programm generieren.

se RT Controller für den Einsatz im **GT**PROZESSAS geeignet, da auch die Prozess-Steuerung und das Messsystem auf PXI/SCXI basiert. Die Integration der Controller hat die Konsequenz, dass dann das PXI/SCXI-Datenerfassungssystem unter Echtzeitbedingungen läuft. Dieses beinhaltet, dass die gesamten Messdaten nur über das Ethernet oder die RS232 Schnittstelle dem Host-System zur Verfügung stehen. Aufgrund der großen Datenmengen (Bildverarbeitung, I/O-Kanäle u.a.) und der komplexen Programme für die Prozess-Steuerung und das Messsystem ist diese Vorgehensweise unter der Anforderung der Echtzeitfähigkeit nicht umzusetzen.

FieldPoint [52] ist eine Plattform für verteilte und modulare I/O-Systeme, die speziell für den Einsatz in verteilten Systemen konzipiert ist. Mit Hilfe von FieldPoint kann ein solches I/O-System auch mit Computern jeder beliebigen Plattform, welche mit TCP/IP arbeiten, mit weiteren FieldPoint-Modulen und beliebigen anderen Ethernet- bzw. seriellen Geräten kommunizieren, wodurch ein zuverlässiges, intelligentes und verteiltes System konzipiert werden kann. Anwendungen, die sich besonders für diese Konfiguration eignen, sind embedded Applikationen wie Fernsteuerungen oder Regelungen in einem Netzwerk, wo ein zuverlässiger Echtzeitbetrieb gefordert ist. Die Kombination aus FieldPoint und dem **GT**PROZESSAS bildet daher eine ideale Lösung in Bezug auf die Kommunikation (siehe Abb. 6.5) mit dem Host-System und den Echtzeitanwendungen [53].

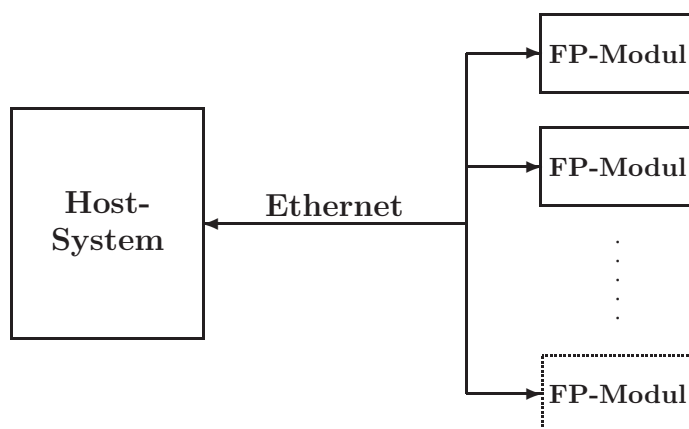


Abbildung 6.5: Kommunikation von FieldPoint-Modulen mit dem Host-System

Fazit

Durch die Kombination des PXI/SCXI-Systems können die Vorteile des PXI-Systems im Bereich der Signalverarbeitung flexibel mit Modulen des SCXI-Systems zur Signalkonditionierung, in Bezug auf Funktionalität, Leistung und Kosten optimiert werden. Durch den modularen Aufbau gewährleistet der PXI/SCXI-Standard eine offene Plattform, die leicht auf differenzierte Fragestellungen - durch den Einsatz unterschiedlicher Controller sowie I/O-Module - angepasst werden kann.

Die Möglichkeit, unabhängige Regler unter Echtzeitbedingungen einzusetzen, öffnet das **GT_{PROZESSAS}** für Applikationen, wo Stabilität und Rechtzeitigkeit gefordert sind. Dieser Aspekt ist eine wesentliche Zielsetzung für eine Erweiterung des **GT_{PROZESSAS}** und erhöht zugleich die Flexibilität.

6.1.6 Aufbau des Softwaresystems

Im Kapitel *Grundkonzept für das GT_{PROZESSAS}* (Kapitel 6.1) ist die grundlegende Struktur des Softwaresystems definiert, welche sich in die beiden Bereiche für die System- und Anwendersoftware aufteilt (vgl. Abb. 6.3). Dabei beinhaltet die Systemsoftware für das **GT_{PROZESSAS}** nur das Betriebssystem, da keine weiteren systemspezifischen Programme benötigt werden. Die Anwendersoftware unterteilt sich in die Programmodule für die Prozess-Steuerung und das Messsystem, welche ausführlich in dem Kapitel 6.2 *Programmmodule für die Prozess-Steuerung* und im Kapitel 6.3 *Programmmodule für das Messsystem* konzipiert werden.

Im weiteren wird auf die Aspekte zur Auswahl des Betriebssystems eingegangen, mit welchem die Anforderungen an das **GT_{PROZESSAS}** umgesetzt werden können. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist dabei die eingesetzte Entwicklungsumgebung LabVIEW, da keine weiteren spezifischen Anforderungen an das Betriebssystem gestellt werden.

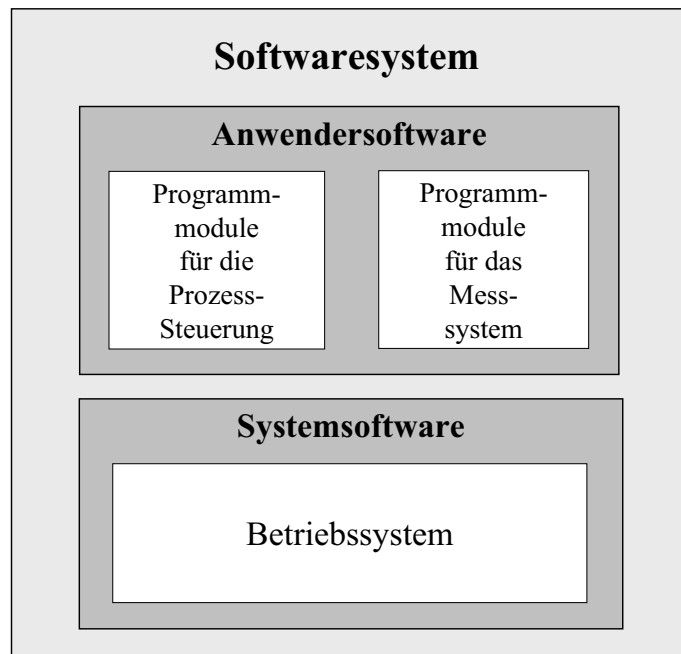


Abbildung 6.6: Softwaresystem des GT_{PROZESSAS} mit den beiden Bereichen System- und Anwendersoftware

Systemsoftware

Das GT_{PROZESSAS} ist bezüglich der Auswahl der Systemsoftware für ein Microsoft Win32 Betriebssystem konzipiert worden. Die Gründe dafür sind in Verbindung mit der Entwicklungsumgebung LabVIEW zu sehen. Grundsätzlich sind erstellte LabVIEW Applikationen unabhängig von der Plattform, also auch vom Betriebssystem. Eine auf einem Windows System erstellte Applikation ist auch unter weiteren Betriebssystemen wie Linux, Solaris oder Macintosh ablauffähig und umgekehrt [54]. Das gilt, solange keine spezifischen Eigenschaften des Betriebssystems benutzt werden. Dieses ist aber sowohl in der Prozess-Steuerung wie auch im Messsystem der Fall. Dort wird das DDE⁷-Protokoll als ein Microsoft Standard für die Kommunika-

⁷DDE: **D**ynamic **D**ata **E**xchange. DDE ist ein Standard Protokoll zur Kommunikation zwischen Windows Applikationen. Im März 1996 hat Microsoft den DDE Standard in ActiveX umbenannt und funktional erweitert.

tion mit Microsoft Excel (vgl. Kapitel 6.2.3) und über entsprechende Server auch für externe Geräte eingesetzt.

Dieses ist jedoch nicht als der primäre Grund zu sehen, da bezüglich dem DDE Standard ggf. auch andere Lösungsansätze für weitere Plattformen konzipiert werden könnten. Zum heutigen Zeitpunkt ist die Software-Unterstützung der Hardware-Komponenten von National Instruments, durch eine geeignete Treiber-Ebene hinsichtlich der weiteren Betriebssysteme nur teilweise gewährleistet. Dieses bedeutet, dass der Aspekt der Erweiterbarkeit des **GT_{PROZESSAS}** deutlich einschränkt ist. Gerade dieser Gesichtspunkt stellt jedoch für das laufende Forschungsvorhaben eine wichtige Basis dar. Aus diesem Grunde sind dahingehende Einschränkungen nicht akzeptabel.

Grundstruktur der Programmmodule im GT_{PROZESSAS}

Grundlegend wird die Anwendersoftware, wie in Abb. 6.6 dokumentiert, unterteilt in die beiden Programmmodule für die Prozess-Steuerung und das Messsystem. Diese Unterteilung ergibt sich aus den funktionalen Anforderungen an die Anwendersoftware für die Steuerung der Prozesse und der Messdatenerfassung.

Bei der Konzeption Softwarestruktur ist eine synchrone (bezogen auf die Prozesse und bildgebenden Verfahren) und periodische (bezogen auf die Prozessgrößen) Messdatenerfassung berücksichtigt worden. Aus diesen Anforderungen lässt sich die in Abb. 6.7 dargestellte Grundstruktur für die Module der Prozess-Steuerung und des Messsystems entwickeln. Die Struktur beinhaltet einen parallelen Ansatz mit den daraus resultierenden Vorteilen in Bezug auf die Erstellung einer synchronen und periodischen Messwerterfassung.

Sicherlich gewährleistet der parallele Ansatz nicht prinzipiell auch eine periodische Erfassung der Prozessgrößen, aber er unterstützt die dafür erforderlichen Techniken und ermöglicht, falls erforderlich, auch eine Transformation auf weitere Rechnersysteme. Dabei ist zu bemerken, dass vor allem in Bezug auf die Entwicklungsumgebung

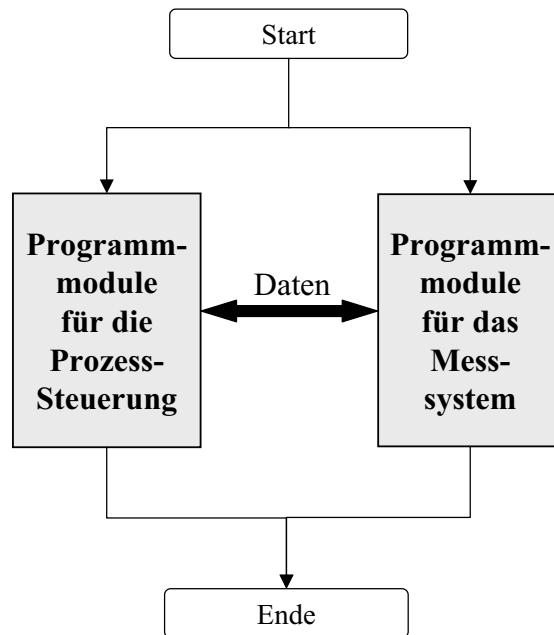


Abbildung 6.7: Grundlegende Softwarestruktur für die Programmmodule der Anwendersoftware im GT_{PROZESSAS}

die Technik der parallelen Programmierung durch den datenfluss orientierten Ansatz der Abarbeitung von LabVIEW Applikationen effizient umzusetzen ist.

Für eine periodische Erfassung der Prozessgrößen wird für die Gaswechsel- und Translokationsmessungen die Technik der ereignisorientierten Datenerfassung eingesetzt. Damit besteht die Möglichkeit einer kontinuierlichen Messdatenerfassung mit dem Vorteil, dass die Erfassung der Prozessgrößen nicht durch Interaktionen der Prozess-Steuerung des Anwenders oder durch Prozesse des Betriebssystems in ihrer Ausführbarkeit beeinflusst werden. Die Konzeption der ereignisgesteuerten Datenerfassung wird ausführlich in dem Kapitel *Programmmodule für das Messsystem* (Kapitel 6.3) dargestellt.

Durch die funktionale Trennung der Programmmodule ist eine Kommunikation zwischen der Prozess-Steuerung und dem Messsystem über global definierte Variablen möglich. Diese ist notwendig für die Ausführung der in der Excel Steuerdatei integrierten Steuer-Funktionen für das Messsystem, zu denen u.a. die Steuerung der

Datenaufzeichnung oder der Zeitpunkt der Bilderfassung zu zählen ist. Mit dieser Schnittstelle kann die Prozess-Steuerung an das Messdatensystem Steueranweisungen übergeben und gleichzeitig auf alle Prozessgrößen global zugreifen. Diese Vorgehensweise beinhaltet das Prinzip der Modularität, gewährleistet gleichzeitig eine Kommunikation zwischen den einzelnen Modulen und ermöglicht damit eine korrelierte Datenanalyse.

6.2 Programmmodule für die Prozess-Steuerung

Im Kapitel *Grundkonzept für das GTPROZESSAS* (Kapitel 6.1) wurde die Umsetzung der entsprechenden Anforderungen an die Steuerung der pflanzenphysiologischen Prozesse ausführlich diskutiert. Dabei ist ein wesentlicher Aspekt, über eine Steuerdatei und der programmierbaren Steuerung externe Parameter der Gaswechsel- und Translokationsprozesse zu beeinflussen.

6.2.1 Allgemein

Für die Umsetzung dieser Anforderung durch das **GTPROZESSAS** ist die zentrale Frage, auf welcher Basis diese spezielle Steuerdatei entwickelt wird. Die grundlegenden Anforderungen an diese sind im Kriterienkatalog (siehe Kapitel 4.2.1) definiert. Dabei ist neben der Funktionalität ein wichtiger Aspekt, dass die Steuerung der Prozesse nicht durch einen Eingriff in das Softwaresystem erfolgt. Diese Vorgehensweise für die Steuerung der Prozesse beinhaltet eine Reihe von Vorteilen - z.B. zeitoptimal, da keine Einarbeitung in die vorhandene Anwendersoftware erforderlich ist, eine effektive Umsetzung der Versuchsdurchführung, da im Vorfeld das Experiment geplant werden kann sowie eine leichte Erweiterung auf neue wissenschaftliche Experimente.

Grundsätzlich wird diese Steuerdatei mit Hilfe einer Microsoft Excel Tabelle erstellt. Dieses bedeutet, dass nicht befehlsorientiert, sondern mit einer entsprechenden Tabelle gearbeitet wird. Diese Vorgehensweise erlaubt dem Anwender die Erstellung

der Versuchsdurchführung mit einer Microsoft Standard Software und erhöht zusätzlich die funktionale Transparenz, was ausführlich in dem Kapitel *Die Microsoft Excel Steuertabelle* (Kapitel 6.2.5) aufgezeigt wird. Die aus dieser Tabelle erzeugte Microsoft Excel Steuerdatei wird mit Hilfe des in Abb. 6.8 dargestellten Programmmoduls der programmierbaren Steuerung eingelesen und entsprechend der durch den Nutzer erstellten Vorgaben abgearbeitet.

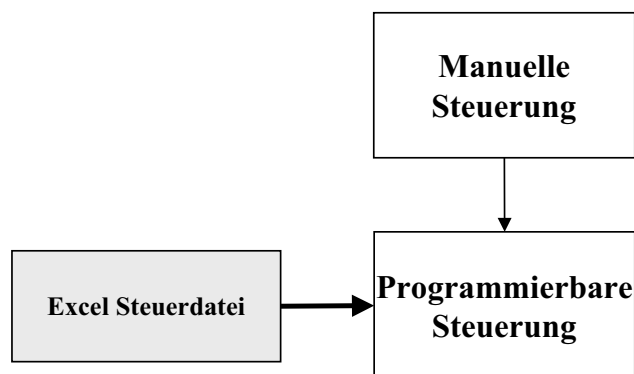


Abbildung 6.8: Stark vereinfachte Struktur der Programmmodule für die Prozess-Steuerung

Ergänzend zu der automatisierten ist die manuelle Steuerung konzipiert worden. Grundsätzlich ist der Anwender mit beiden Steuerungen in der Lage, alle physikalischen Prozessgrößen zu beeinflussen. Hinsichtlich ihres Einsatzes unterscheiden sich die beiden Steuerungen jedoch deutlich. Die manuelle Steuerung wird im wesentlichen zur Fehlerdiagnose, Grundeinstellung des Systems, Kalibrierung und der Durchführung von Versuchsabläufen mit gezielter Eingriffsmöglichkeit eingesetzt.

Im Gegensatz dazu ist die programmierte Steuerung für komplexe Versuchsabläufe von wenigen Minuten bis mehreren Tagen mit exakt reproduzierbaren Versuchsbedingungen entwickelt.

6.2.2 Manuelle Steuerung

Die manuelle Steuerung ist so konzipiert, dass der Benutzer die Möglichkeit hat, alle Aktoren des gesamten **GTPROZESSAS** interaktiv mit Hilfe einer entsprechenden Benutzeroberfläche anzusteuern. Die dafür entwickelte Benutzeroberfläche ist in Abb. 6.9 aufgezeigt. Über das LabVIEW *Tab Control* Element kann eine entsprechende Oberfläche für *Digital out*, *Analog out*, *MFC*, *Licor-7000* und *Settings* ausgewählt werden, mit welcher der Anwender in der Lage ist, den Aktor zu steuern. Exemplarisch ist in der Abbildung die Oberfläche für *Digital out* dargestellt. Diese wird für

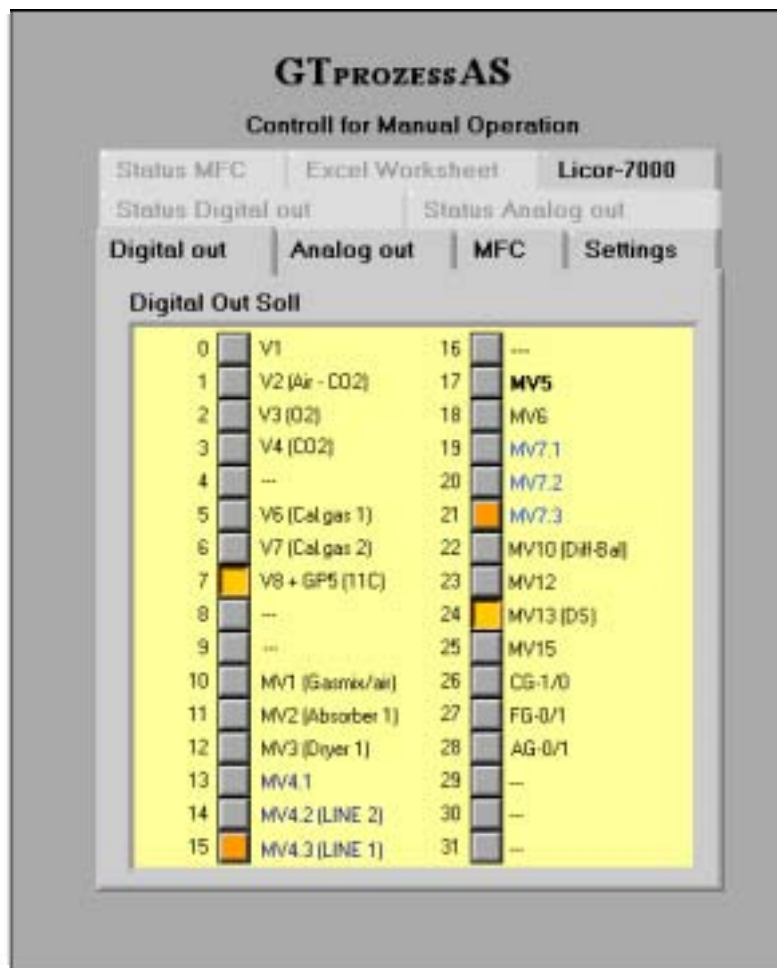


Abbildung 6.9: Benutzeroberfläche für die manuelle Steuerung des **GTPROZESSAS**

Aktoren (Magnetventile) eingesetzt, die über einen digitalen I/O-Kanal angesteuert werden.

Die Benutzeroberfläche ist dahingehend erweitert worden mit der zusätzlichen Möglichkeit, bei der Abarbeitung der Excel Steuerdatei, den Status (siehe Abb. 6.10) aller Aktoren im Gaswechselsystem sowie die Abarbeitung der Excel Steu-

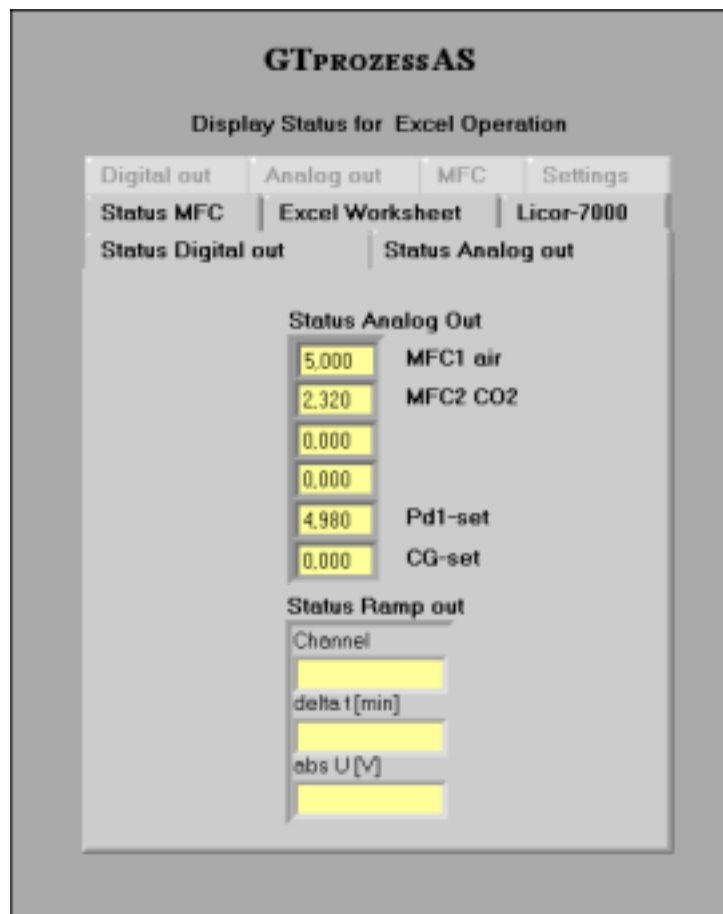


Abbildung 6.10: Benutzeroberfläche für die Anzeige des Ist-Zustands der Aktoren im Gaswechselsystem

erdatei darzustellen. Damit soll sichergestellt werden, dass der Anwender bei der manuellen und programmierbaren Steuerung den Ist-Zustand des **GTPROZESSAS** überwachen kann.

Die Schnittstelle zu den einzelnen Prozessen ist das PXI/SCXI-Datenerfassungssystem mit den entsprechenden I/O-Modulen (siehe Tabelle 6.1) und Geräte aus dem Bereich der Mess- und Automatisierungstechnik wie z.B. Massendurchflusscontroller oder Kältefallen.

Diese statische Ansteuerung der Aktoren ist aber für die Durchführung von komplexen Versuchsabläufen nicht ausreichend. Im Gaswechselsystem wird u.a. eine steigende reproduzierbare CO₂-Konzentration für die Untersuchung des Einflusses von CO₂ auf die Photosyntheserate oder eine lineare Druckerhöhung in der Blattkammer (vgl. Kapitel 8) benötigt. Für diese Anwendungsfälle muß der entsprechende Aktor mit Hilfe einer zu spezifizierenden Rampenfunktion angesteuert werden. Eine entsprechende Funktion wurde für dieses Experimente konzipiert und ist integraler Bestandteil der Prozess-Steuerung.

Bei der Durchführung des Experimentes kann für die Rampenfunktion gezielt ein entsprechender Aktor ausgewählt, Startwert, Endwert und Rampendauer als Parameter definiert sowie die Funktion zeitsignifikant gestartet werden.

Mit der Entwicklungsumgebung LabVIEW können dazu beliebig komplexe, leistungsfähige Module erstellt werden, womit Daten von einem Auftrag zu einem oder mehreren, parallelen Aufträgen geleitet werden, um so unabhängige Programme mit den entsprechenden Parametern auszuführen. Die Methodik dieser Programmierung ist in LabVIEW durch die *Notification* Funktion umzusetzen [55].

Bei der manuellen Steuerung wie auch über die Microsoft Excel Steuerdatei kann der Zeitraum, zu der die Daten aufgezeichnet über eine Start/Stop Bedingung gesteuert sowie das Speicherintervall flexibel definiert werden. Dieses ist notwendig zur Kompression der entstehenden Datenmengen, wenn bei komplexen Versuchsverläufen über einen Zeitraum von einigen Stunden bis mehreren Tagen gemessen wird. Dabei ist eine Datenaufzeichnung in der Regel nur in bestimmten Zeitfenstern erforderlich. Diese Vorgehensweise hat für das Experiment den Vorteil, dass durch die beiden Parameter die Datenaufzeichnung flexibel dem Versuchsablauf angepasst werden kann.

6.2.3 Programmierbare Steuerung

Die für die programmierbare Steuerung erforderliche Steuerdatei wird, wie bereits erwähnt, mit Hilfe einer Microsoft Excel Tabelle erstellt. Diese eignet sich besonders dafür, da die Struktur transparent und leicht erweiterbar, auf den Windows Plattformen verfügbar sowie von vielen Nutzern Microsoft Excel bereits von anderen Anwendungen bekannt ist. Unterstützt wird dieses noch durch die Tatsache, dass zu Microsoft Excel über das DDE-Kommunikationsprotokoll eine entsprechende Schnittstelle zur Verfügung steht, um die Datei leicht in eine weitere Windows Applikation zu importieren (siehe Kapitel 6.2.4).

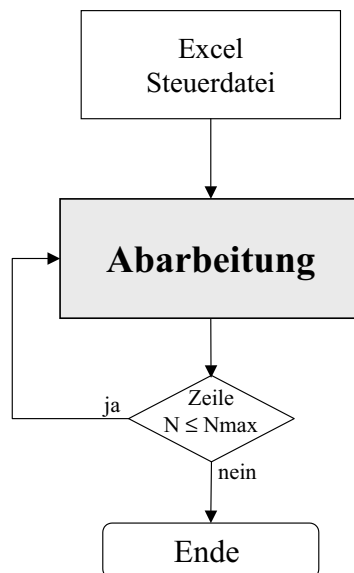


Abbildung 6.11: Programmstruktur der programmierbaren Steuerung für die Abarbeitung der Microsoft Excel Steuerdatei

Der funktionale Umfang der Microsoft Excel Steuerdatei beinhaltet alle Möglichkeiten der manuellen Steuerung. Das umfasst die statische und die über Funktionen definierte Ansteuerung aller Aktoren, die Anpassung der Datenaufzeichnung an die Versuchsdurchführung sowie die Steuerung der Bilderfassung. Da die Möglichkeit der selektiven Ansteuerung eines jeden Aktors besteht, kann zusätzlich auch über die Microsoft Excel Steuerdatei eine beliebige Funktion (vgl. manuelle Steuerung)

durch den Anwender definiert werden, jedoch mit einer begrenzten Zeitauflösung. Diese ergibt sich aus der Zeit für die Abarbeitung der Excel Steuerdatei und der Spezifikation der entsprechenden Hardware-Komponente (typ. Zeitauflösung für das SCXI-1163 Modul ist 1,4 ms).

Die Abbildung 6.11 zeigt eine vereinfachte Programmstruktur der programmierbaren Steuerung. Die Abarbeitung der Steuerdatei erfolgt zeilenorientiert mit einer sequenziellen Auswertung der einzelnen Spalten. Über die Benutzeroberfläche (vgl. Abb. 6.12) wird eine dem Versuch entsprechende Microsoft Excel Steuerdatei vor-

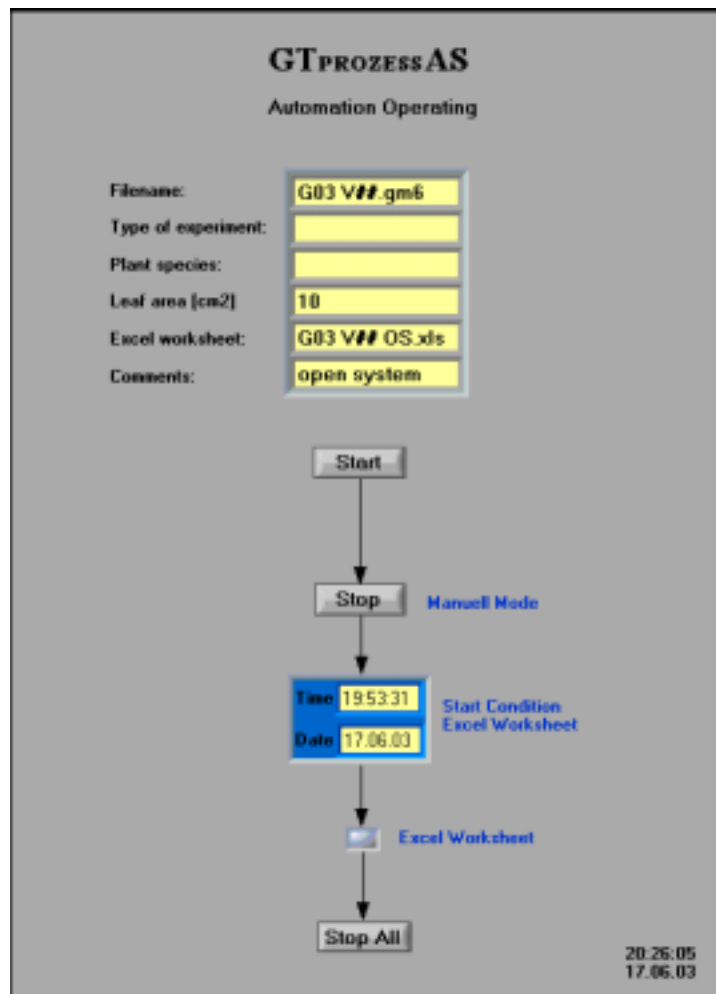


Abbildung 6.12: Benutzeroberfläche der programmierbaren Steuerung für die Abarbeitung der Excel Steuerdatei

gegeben (Excel Worksheet) und für eine Abarbeitung durch das **GTPROZESSAS** eingelesen.

6.2.4 Die Schnittstelle zu Microsoft Excel

Der Datenaustausch zwischen dem **GTPROZESSAS** und Microsoft Excel wird mit Hilfe des DDE-Protokolls realisiert. Der von Microsoft entwickelte Standard steuert dabei die Kommunikation von unterschiedlichen 32-bit-Programmen. Da der Standard auch von LabVIEW [56] unterstützt wird, kann eine entsprechende Applikation z.B. Microsoft Excel starten, eine vorhandene Tabelle öffnen und die darin abgelegten Daten verändern oder importieren.

Die Prozess-Steuerung nutzt diese Technik, um die mit Microsoft Excel erzeugte Steuerdatei in die Versuchsapplikation zu importieren. Die Abb. 6.13 zeigt das LabVIEW Programmmodul, mit welchem die Prozess-Steuerung die in der Benutzeroberfläche vorgegebene Steuerdatei (Excel Datenfile) importiert. Mit Hilfe des DDE

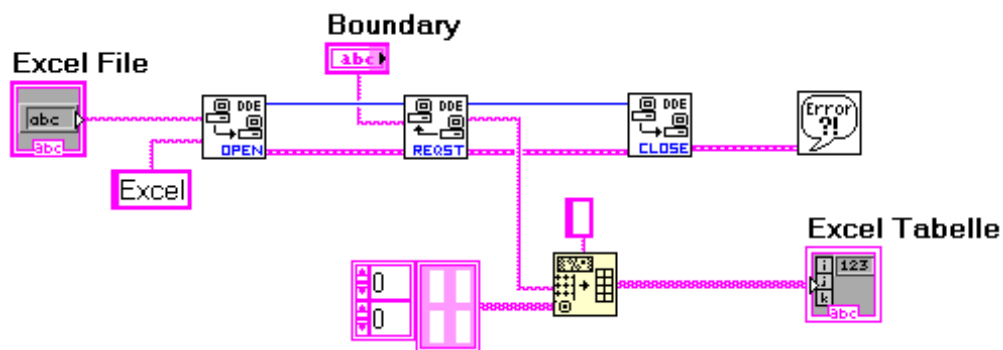


Abbildung 6.13: Programmmodul für das Importieren der Microsoft Excel Steuerdatei

Standards wird zuerst das Excel File geöffnet, die erforderlichen Daten importiert und danach die Kommunikation mit Excel beendet. Die importierten Daten werden mit *Spreadsheet String To Array* Funktion für die weitere Verarbeitung in der Prozess-Steuerung konvertiert.

Analoges gilt auch für das Messsystem. Dort wird mit dem gleichen Verfahren eine Microsoft Excel Datei für die Kalibrierung der einzelnen Prozessgrößen importiert. Das heißt, in der Datei sind entsprechende Kalibrierungsfaktoren für die einzelnen Sensoren definiert. In dem Kapitel *Programmmodule für das Messsystem* (Kapitel 6.3) ist dieses ausführlich beschrieben.

6.2.5 Die Microsoft Excel Steuertabelle

In den letzten Kapiteln wurde die Microsoft Excel Steuerdatei vorgestellt. In diesem Kapitel wird auf den grundlegenden Aufbau, Einsatz und die Erweiterungsmöglichkeiten der entwickelten Tabelle eingegangen.

In Abbildung 6.14 ist beispielhaft eine typische Microsoft Excel Steuertabelle für Gaswechsel-Experimente dargestellt mit einem kurzen Versuchsverlauf von 4 Stunden 20 Minuten. In der Tabelle werden die einzelnen Funktionalitäten der Versuchsdurchführung der entsprechenden Zeile zugeordnet. Die dafür erforderlichen Parameter sind in den entsprechenden Spalten definiert. Dazu ist eine Unterteilung in die Bereiche Funktionen/Kommentar, Kürzel, Versuchsablauf und Parameter gegeben.

Die Spalte Funktionen/Kommentar ist für eine Dokumentation hinsichtlich der eingesetzten Funktion vorgesehen. Über die symbolischen Kürzel wird eindeutig ein Gerät mit Adresse oder ein I/O-Modul mit entsprechendem Kanal identifiziert. Das bedeutet, dass bei der Abarbeitung der Datei dem Kürzel die Adresse oder der Kanal des entsprechenden Aktors mit Hilfe einer in der Applikation integrierten Zuordnungstabelle automatisch zugewiesen wird. Diese Vorgehensweise erhöht die Transparenz der Tabelle und führt zu einer schnellen Interpretation des Versuchsablaufes.

Die Parameter für die symbolischen Kürzel werden aus den folgenden Spalten Digital/Analog out oder Gerät selektiv zugeordnet. Nur zur besseren Übersicht wird in der Tabelle noch unterschieden, ob es sich um einen digitalen-, analogen Ausgang oder ein konkretes Gerät handelt. Da über das Kürzel der Akteur eindeutig identifi-

0	1	2	5	6	8	11	13	14	15	16	17	19	20
Pos.	Funktion / Kommentar	Kürzel	Versuchsablauf		Bedingungen	Parameter							
	Formate/Bereiche -->		Datum - Uhrzeit TT.MM.JJ. - HH:MM:SS	Rel Zeit H-MM:SS	MUX/RS232	Digital Wert 0/1	Analog out Wert 1 [V]	Wert 2 [V]	Rampen- dauer MM	Messdaten Start 1/0	Intervall s	Wert1	Wert2
	OPEN SYSTEM: LC 350/350 ppm	eLC LC 350/350 ppm											
100	Startbedingungen												
101	CO2-freie Luft ext. LC	MFC-01		0:00:00			5,000						
102	CO2 ext. LC	MFC-02		0:00:00			0,020						
103	Line 2: OFF	MV4.2		0:00:00		0							
104	Line 1: ON	MV4.3		0:00:00		0							
105	CO2-freie Luf LINE1	MFC-11		0:00:00								100	
106	CO2 LINE1	MFC-12		0:00:00								2	
107	CO2-freie Luf LINE2	MFC-21		0:00:00								100	
108	CO2 LINE2	MFC-22		0:00:00								0	
109	System öffnen	MV5		0:00:00		0							
110	KK CO2-Dosierung: AUS	CG-0/1		0:00:00		0							
111	KK CO2: Niedrig	CG-set		0:00:00			0,000						
112	KK Flow: AUS	FG-0/1		0:00:00		0							
113	KK CO2-Absorber: AUS	AG-0/1		0:00:00		0							
114	Druckdifferenz = 0 mbar	Pd1-set		0:00:00			4,982						
115	H ref = H analysator	MV13		0:00:00		1							
116	Referenzkanal	V8+GP5		0:00:00		1							
200	Versuch												
201	Start der Datenaufzeichnung	DAQ		0:00:00						1	60		
202													
203	Bezugszeit		06.03.03 - 19:00:00								10		
204	Druck = 0 mbar	Pd1-set	06.03.03 - 19:00:00	0:00:00			4,982						
205	CO2 eLC-Rampe 350-2000	MFC-02	06.03.03 - 19:20:00	0:20:00			0,020	3,500	40				
206	CO2 eLC=350	MFC-02	06.03.03 - 20:01:00	1:01:00			0,020						
207	Druck = 1 mbar	Pd1-set	06.03.03 - 20:20:00	1:20:00			4,990						
208	CO2 eLC-Rampe 350-2000	MFC-02	06.03.03 - 20:40:00	1:40:00			0,020	3,500	40				
209	CO2 eLC=350	MFC-02	06.03.03 - 21:21:00	2:21:00			0,020						
210	Druck = 2 mbar	Pd1-set	06.03.03 - 21:40:00	2:40:00			4,998						
211	CO2 eLC-Rampe 350-2000	MFC-02	06.03.03 - 22:00:00	3:00:00			0,020	3,500	40				
212	CO2 eLC=350	MFC-02	06.03.03 - 22:41:00	3:41:00			0,020						
213	Druck = 0 mbar	Pd1-set	06.03.03 - 23:00:00	4:00:00			4,982						
300	Ende												
301	KK CO2-Dosierung: AUS	CG-0/1	06.03.03 - 23:20:00	4:20:00		0							
302	KK CO2	CG-set	06.03.03 - 23:20:00	4:20:00			0,000						
303	KK CO2-Absorber: AUS	AG-0/1	06.03.03 - 23:20:00	4:20:00		0							
304	Datenaufzeichnung	DAQ	06.03.03 - 23:20:00	4:20:00						1	60		
305	Messwerterfassung: ENDE	DAQ	06.03.03 - 23:20:00	4:20:00						0			

Abbildung 6.14: Microsoft Excel Tabelle für die Steuerung von pflanzenphysiologischen Experimenten

ziert ist, könnte die Tabelle auch weiter komprimiert werden, was aber die Lesbarkeit erschweren würde.

Eine Steuerung des Versuchsablaufes ist über das Datum, die Uhrzeit und über spezielle Bedingungen möglich. Falls alle drei Steuerungsmöglichkeiten genutzt werden, so wird nach Prioritätsschema abgearbeitet. Dabei wird dem Datum die höchste und den Bedingungen die niedrigste Priorität zugeordnet. Im allgemeinen ist immer ein zeitsignifikanter Bezug für die Steuerung des Versuchsablaufes vorgegeben. Das heißt, die Steuerung wartet immer bis Datum und Uhrzeit aus der Microsoft Excel Steuerdatei mit den entsprechenden Systemgrößen übereinstimmt und arbeitet danach die weiteren Spalten der Excel Zeile ab.

Abb. 6.15 zeigt das Programmmodul, welches Datum und Uhrzeit aus der Excel Steuerdatei auswertet. Dazu wird aus der abzuarbeitenden Excel Zeile die entsprechende Spalte (5) mit der Information von Datum und Uhrzeit selektiert. Eine *While Loop* vergleicht die Systemzeit mit der in der Excel Steuerdatei definierten Zeitin-

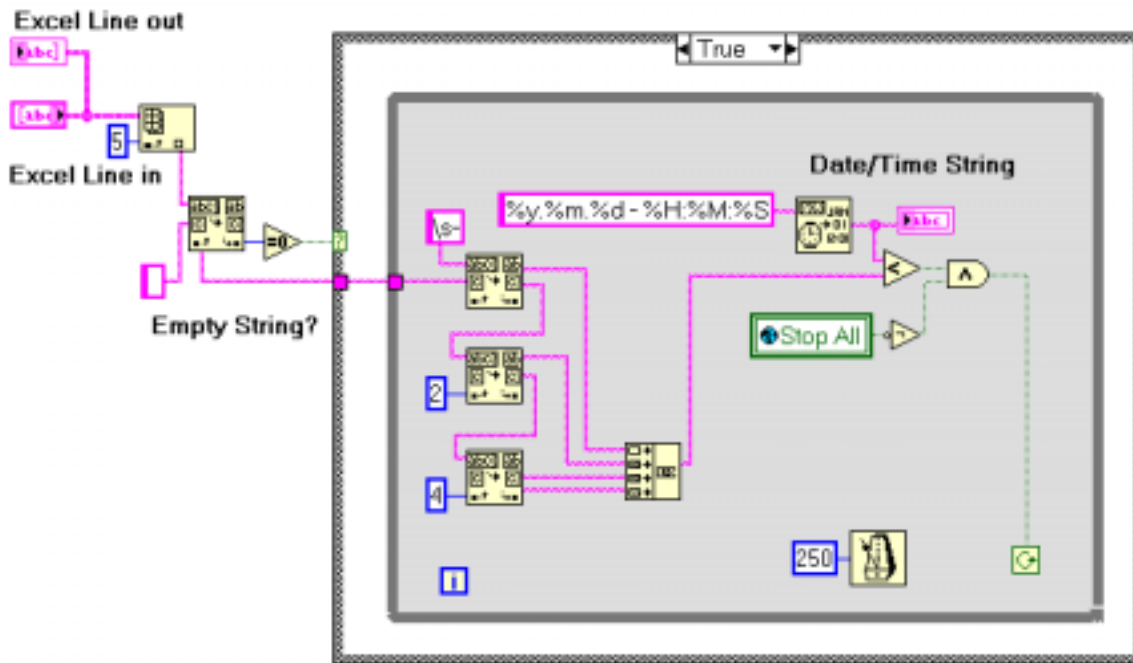


Abbildung 6.15: Programmmodul für die Auswertung von Datum und Uhrzeit aus der Microsoft Excel Steuerdatei

formation. Falls diese Bedingung erfüllt ist, wird das Programmmodul beendet und die nächste Spalte durch die Prozess-Steuerung abgearbeitet. Alternativ kann die Startbedingung für die Abarbeitung der Excel Steuerdatei über die in Abb. 6.12 dargestellte Benutzeroberfläche definiert werden. Die zeitliche Steuerung für die Abarbeitung für die nächste Zeile wird dann aus den relativen Zeitangaben (Spalte 6) in der Steuerdatei berechnet.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Zeitsignifikanz mit den spezifischen Bedingungen zu koppeln. Bedingungen können z. B. *if/and/or* Verknüpfungen der Prozessgrößen mit einer Konstanten oder weiteren Prozessgrößen sein. Ergänzt mit entsprechenden Vergleichsbedingungen kann so zum Beispiel mit der *if* $\langle \text{Messkanal} \rangle = \langle \text{Konstante} \rangle$ mit einer Anweisung so lange gewartet werden, bis eine Prozessgröße eine vorgegebene Schwelle erreicht hat. Mit Hilfe der Bedingungen lassen sich beliebig komplexe Abfragen konstruieren, um auf diesem Wege einen Versuchsablauf über die Microsoft Excel Steuerdatei flexibel den experimentellen Anforderungen anzupassen.

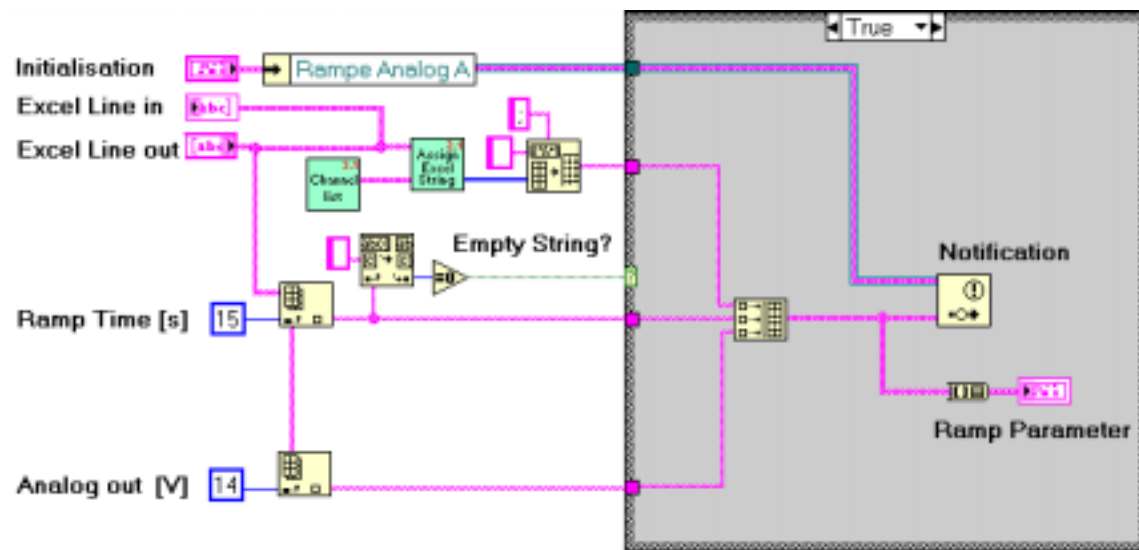


Abbildung 6.16: Auswertemodul für den Start der Rampenfunktion über die Microsoft Excel Steuerdatei

Die Spalten für die Parameter sind eingeteilt in die Bereiche zur Ansteuerung der Aktoren (Digital out, Analog out, Gerät), die Möglichkeit, die Rampendauer sowie Start/Stop Bedingungen und Speicherzyklus für die Datenaufzeichnung zu definieren.

In der Excel Steuerdatei (Abb. 6.14) ist an Position 205 beispielhaft aufgezeigt, wie eine Rampenfunktion für einen Aktor, welcher analog anzusteuern ist, definiert wird. Das entsprechende Programmmodul ist in Abb. 6.16 dargestellt. Dieses verarbeitet die für die Rampe definierten Parameter (Spalte 14 und 15) und das Kürzel für die

6.3 Programmmodule für das Messsystem

Im Kapitel *Grundkonzept für das GT_{PROZESSAS}* (Kapitel 6.1) wurden die Umsetzungen der entsprechenden Anforderungen an die Softwarestruktur des Messsystems erörtert. Dabei ist als wesentlicher Ansatz eine synchrone und periodische Messdatenerfassung für die einzelnen pflanzenphysiologischen Prozesse und das bildgebende Verfahren zu entwickeln.

Das Messsystem in Abb. 6.18 ist so konzipiert, dass die Möglichkeit der Auswahl bezüglich der Messungen für die Gaswechsel-, Translokationsprozesse und dem bild-

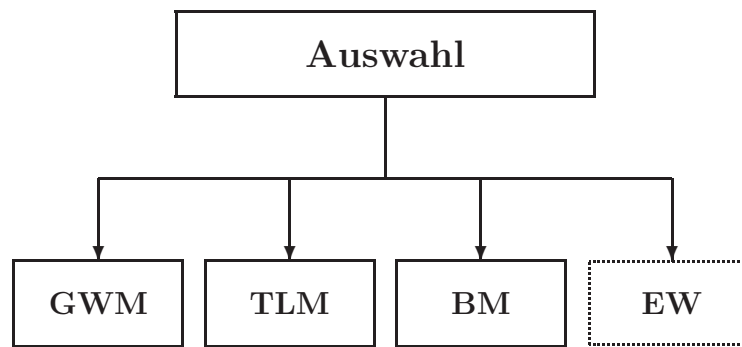


Abbildung 6.18: Stark vereinfachte Softwarestruktur des Messsystems, **GWM:** Gaswechselmessungen, **TLM:** Translokationsmessungen, **BM:** Bildgebendes Messverfahren, **EW:** Erweiterungen

gebenden Verfahren über die Benutzeroberfläche besteht. Damit ist der Anwender in der Lage, seine Messdatenerfassung selektiv und individuell in ihren Anteilen zu kombinieren und so auf die unterschiedlichen wissenschaftlichen Fragestellungen hin flexibel zu konfigurieren. Die parallele Programmstruktur unterstützt eine synchrone Messdatenerfassung bei allen Kombinationen sowie eine leichte Erweiterung des vorhandenen Messsystems.

Die einzelnen Teilprogramme für Gaswechsel-, Translokationsmessungen und das bildgebende Verfahren sind so konzipiert, dass sie als unabhängige Einzelprogramme ablauffähig, aber gleichzeitig auch im Gesamtsystem zu integrieren sind.

6.3.1 Gaswechsellmessungen

Die Grundlagen für die Konzeption der Gaswechsellmessungen sind die in dem Kapitel *Anforderungen an das Messsystem* (Kapitel 4.2.2) angesprochenen Aspekte. Aus diesen Kriterien sind die Aufgaben an das Modul für die Gaswechsellmessungen mit einer periodischen Messdatenerfassung, Analyse-, Präsentation- und Archivierung der Messdaten abzuleiten. Aus diesen Anforderungen ist die in Abb. 6.19 dargestellte Grundstruktur entwickelt worden.

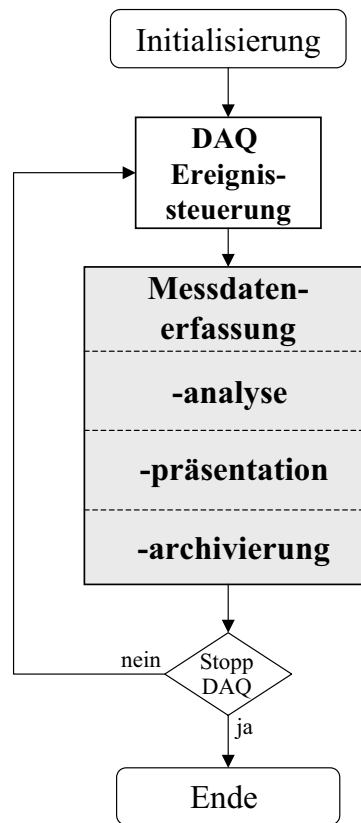


Abbildung 6.19: Programmstruktur des Messsystems für die Gaswechselprozesse, **DAQ:** Data Acquisition

Grundlegend ist das Messsystem für die Gaswechselprozesse so konzipiert, dass eine asynchrone kontinuierliche Messdatenerfassung durchgeführt wird. Für eine Umsetzung dieser Technik wird das PXI/SCXI-Datenerfassungssystem mit dem I/O-

Modul PXI-6031E (vgl. Kapitel 6.1.3) eingesetzt. Es steuert mit einem Hardware-Timing [57] die Abtastung der Messsignale und speichert sie in einem zu konfigurierenden *Buffer*. Diese Methodik der Messwerterfassung hat den Vorteil, dass die Erfassung nicht durch Anwenderinteraktionen unterbrochen werden kann, wie das z.B. bei einem Software-Timing der Fall ist.

Die zentrale Steuerung der Programmausführung wird über die DAQ-Ereignissteuerung gewährleistet. Diese überwacht die Messdatenerfassung und synchroni-

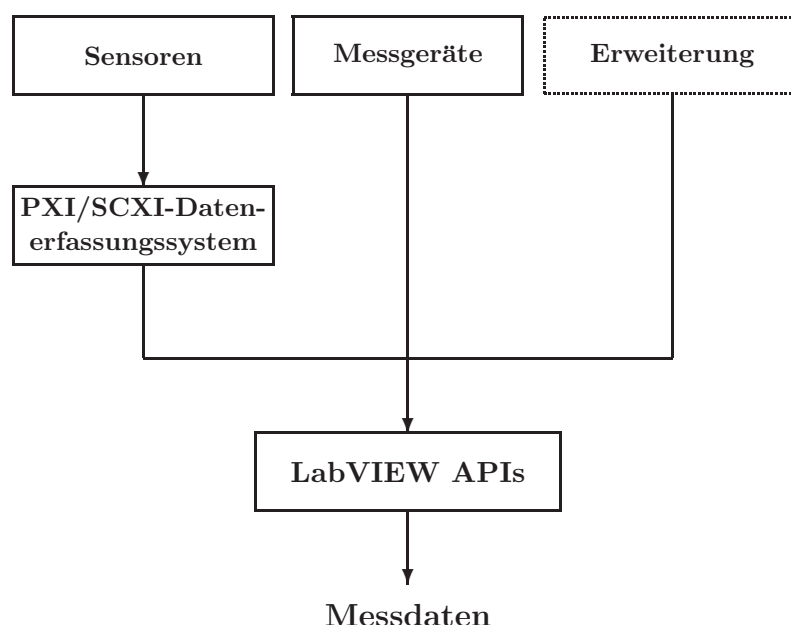


Abbildung 6.20: Stark vereinfachte Struktur der Messdatenerfassung für die Gaswechselmessungen

siert diese mit dem Anwenderprogramm über einen entsprechenden Programmaufruf. Über die DAQ-Ereignissteuerung greift damit das Programm in bestimmten vorgegebenen Zeitabständen auf die zwischengespeicherten Messdaten des PXI/SCXI-Datenerfassungssystems zu. Bei jedem Programmaufruf werden parallel, wie in Abb. 6.20 dargestellt, die Daten der externen Geräte (z.B. Gasanalysator und Massendurchflussmesser für Gase) erfasst. Die Schnittstellen zwischen den Programmmodulen und dem Hardwaresystem bilden entsprechende von National Instruments ent-

wickelte APIs⁸. Mit Hilfe dieser APIs können die einzelnen LabVIEW Funktionen für die Datenerfassung mit den eingesetzten Mess- und Automatisierungskomponenten kommunizieren. Die Technik, die für die DAQ-Ereignissteuerung bei LabVIEW zur Verfügung steht, basiert auf den DAQ-Occurrence Funktionen [55]. Mit diesen besteht die Möglichkeit, das Anwenderprogramm auf ein externes Datenerfassungs-Ereignis zu synchronisieren, welches hier der Erfassung einer bestimmten Anzahl von Abtastungen entspricht.

Die Vorteile einer solchen DAQ-ereignisgesteuerten Programmierung ist eine zeitlich präzise Messdatenerfassung und die Tatsache, dass keine Prozessorzeit in An-

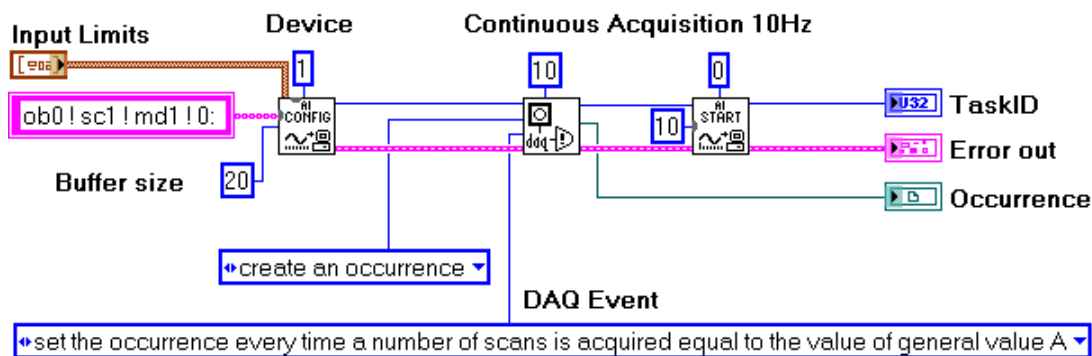


Abbildung 6.21: Programmierung der DAQ-Ereignissteuerung für die Gaswechselmessungen in LabVIEW

spruch genommen wird, solange auf das Ereignis gewartet wird. Gerade in Bezug auf die parallelen Strukturen des Messdatensystems ist eine Optimierung der Einzelprogramme, bezüglich einer minimalen Prozessorzeit, von Vorteil.

Die Abb. 6.21 zeigt beispielhaft die Initialisierung der DAQ-Ereignissteuerung für das PXI-6031E Modul. Dazu wird das Modul mit der LabVIEW Funktion *AI CON-*

⁸API: **A**pplication **P**rogramming **I**nterface. Eine API ist die offengelegte Programmierschnittstelle einer Applikation oder eines Betriebssystems. Die Methoden einer API erlauben es, eigene Funktionen zu integrieren und die Kommunikation zwischen verschiedenen Anwendungen sowie zwischen Anwendungen und Hardwarekomponenten zu ermöglichen.

FIG initialisiert, die *Occurrence* Funktion konfiguriert und die Messwerterfassung mit der *AI START* Funktion kontinuierlich mit 10 Hz gestartet.

Die Messdatenerfassung kann leicht mit zusätzlichen Geräten erweitert werden. In den folgenden beiden Kapiteln wird beispielhaft aufgezeigt, wie zwei Einzelgeräte in das Messsystem integriert werden können. Dieses sind zum einen ein CO₂/H₂O-Gasanalysator, der direkt über die physikalische Schnittstelle angesteuert wird und zum anderen Massendurchfluss-Messgeräte, welche indirekt über einen DDE-Server integriert werden.

Integration des CO₂/H₂O-Gasanalysators

Der LI-7000⁹ ist ein CO₂- und H₂O-Infrarot-Gasanalysator, der im **GT_{PROZESSAS}** für die Analyse der CO₂- und H₂O-Konzentration eingesetzt wird. Eine Kommunikation ist über die serielle RS-232 Schnittstelle gegeben. Damit besteht die Möglichkeit, das Gerät in das konzipierte Messsystem zu integrieren. Ein Nachteil ist, dass ein Gerätetreiber für LabVIEW nicht verfügbar ist. Die entsprechende Treiber-Software mußte zusätzlich erstellt werden.

Die Entwicklungsumgebung LabVIEW unterstützt dafür eine große Anzahl von Funktionen für die Kommunikation über die physikalischen Schnittstellen mit Hilfe des VISA Standards, der zur Steuerung beliebiger Gerätearten eingesetzt werden kann. Damit ist der Programmierer in der Lage, eine geeignete Treiber-Software [58] zu erstellen.

In Abb. 6.22 ist die Initialisierung für den in Abb. 6.23 entwickelten Gerätetreiber des Licor-7000 dargestellt. Die Basis dafür ist der schon angesprochene VISA Standard, welcher für eine bidirektionale Übertragung von Daten über die serielle Schnittstelle RS-232 genutzt wird. Dieser entwickelte Gerätetreiber bildet die Grundlage für eine Kommunikation des Messsystems mit dem Licor-7000.

⁹Hersteller: LI-COR Inc., 4308 Progressive Avenue, Lincoln, NE 68504

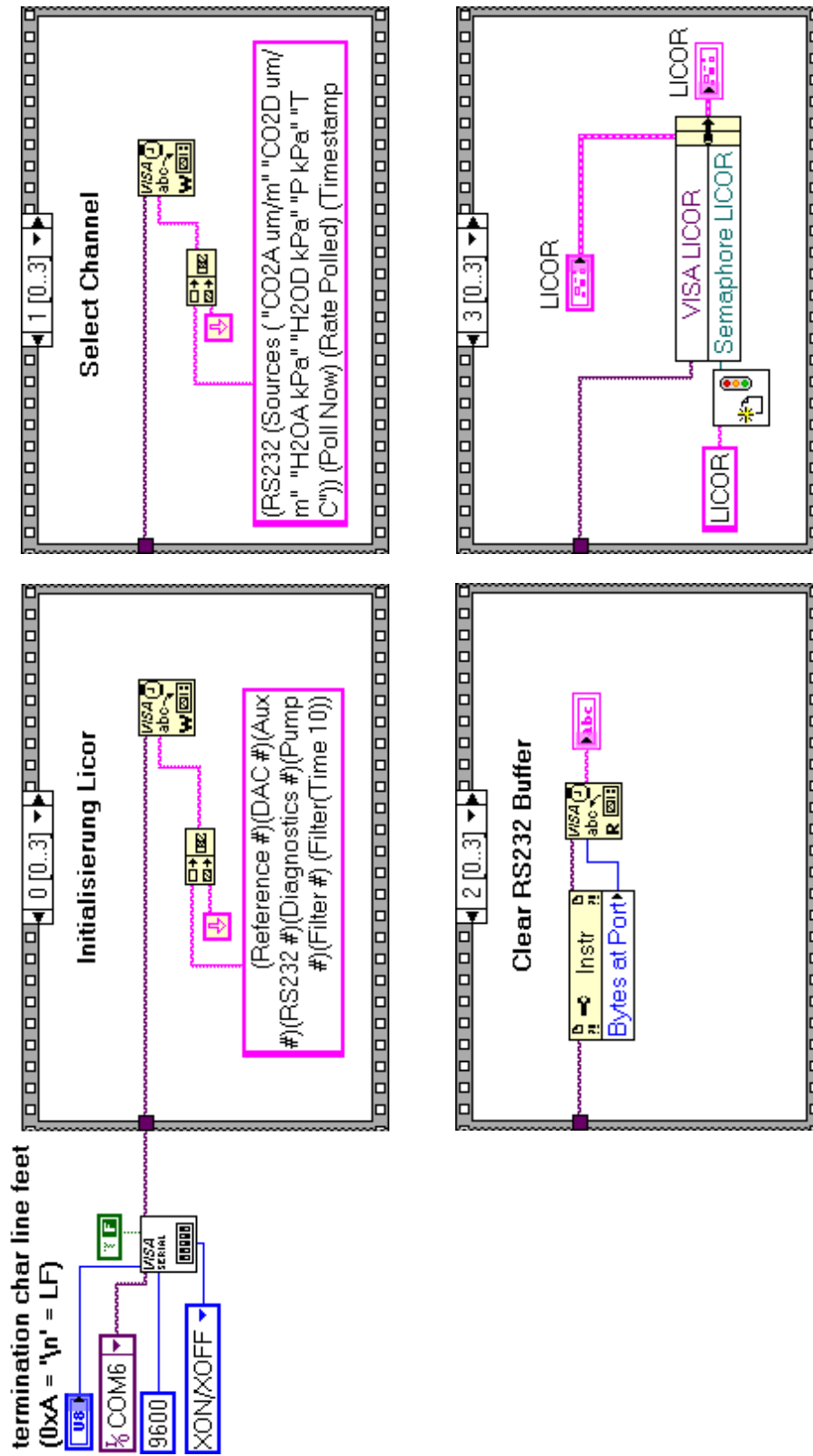


Abbildung 6.22: Initialisierung des LabVIEW Gerätetreibers für den LI-7000

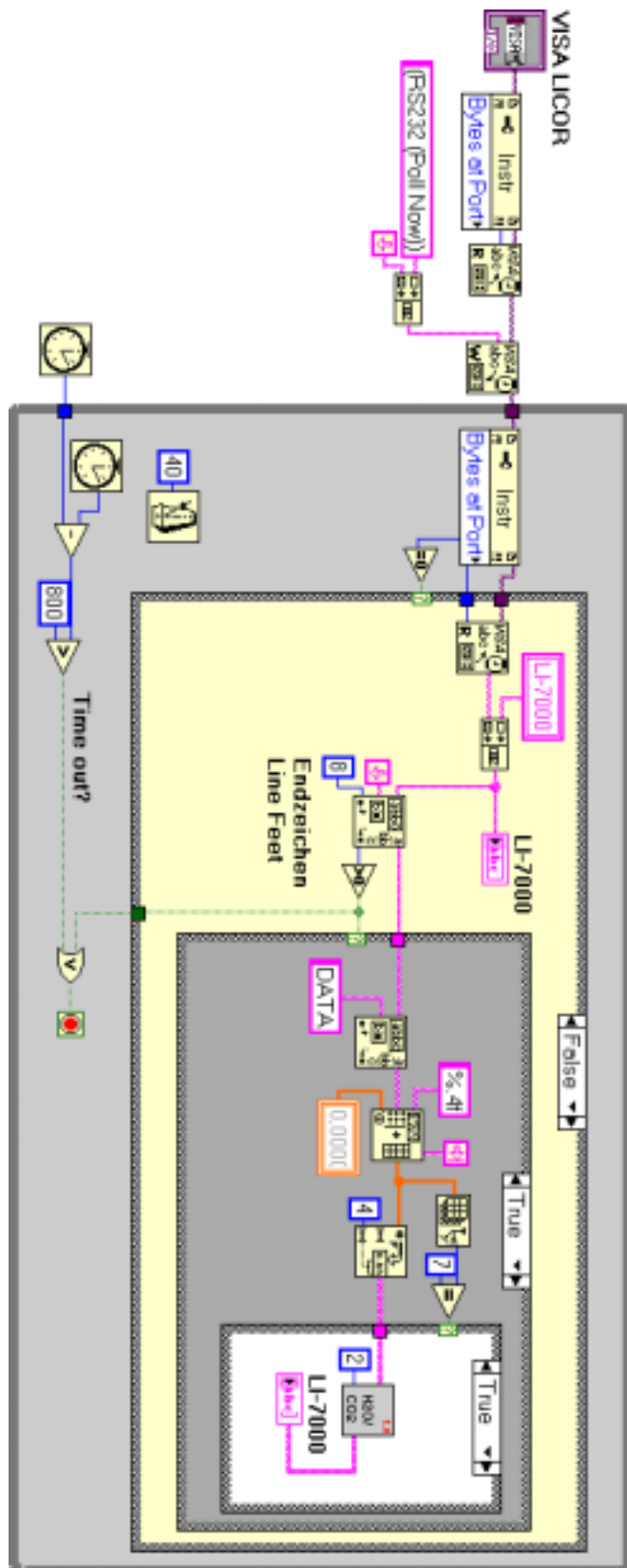


Abbildung 6.23: LabVIEW Gerätetreiber für den LI-7000

Integration der Massendurchfluss-Messgeräte für Gase

Die Massendurchflussmesser der EL-FLOW-Baureihe¹⁰ werden im **GTprozessAS** für die Detektion der unterschiedlichen Massendurchflüsse von Gasen eingesetzt. Durch den internen Feldbus RS-485 können mehrere Einzelgeräte angeschlossen und über einen Controller ausgelesen werden [59].

Die Kommunikation (Abb. 6.24) des Messsystems mit dem Controller wird indirekt über einen DDE-Server realisiert. Der Server steuert den Datenaustausch mit der entsprechenden Applikation (Messsystem) über die DDE-Schnittstelle und über die physikalische Schnittstelle RS-232 die Kommunikation mit dem Controller der Massendurchflussmessgeräte. Der Vorteil eines solchen Verfahrens ist die schnelle In-

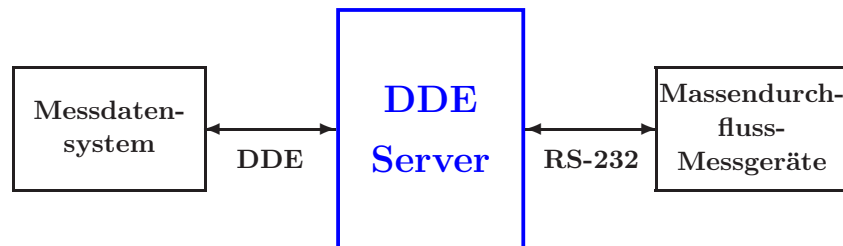


Abbildung 6.24: Prinzipielle Darstellung der Messdatenerfassung für die Massendurchfluss-Messgeräte über einen DDE-Server

tegration der externen Geräte in das Gesamtsystem, da der gesamte Datenaustausch über den Server erfolgt. Damit entfällt, dass eine aufwendige Treiber-Software erstellt werden muß. Der DDE Standard wird von LabVIEW unterstützt, so dass die Massendurchfluss-Messgeräte einfach in das Messsystem eingebunden werden können.

Die Abb. 6.25 zeigt das LabVIEW Programmmodul für eine Kommunikation mit dem Bronkhorst DDE-Server. Die Verbindung zum Server wird geöffnet, das entsprechende Massendurchfluss-Messgerät mit C(1) ausgewählt und mit dem Befehl P(8) werden die Daten vom Server angefordert.

¹⁰Hersteller: Bronkhorst High-Tech B.V., Nijverheidsstraat 1A, 7261 AK Ruurlo, Netherlands

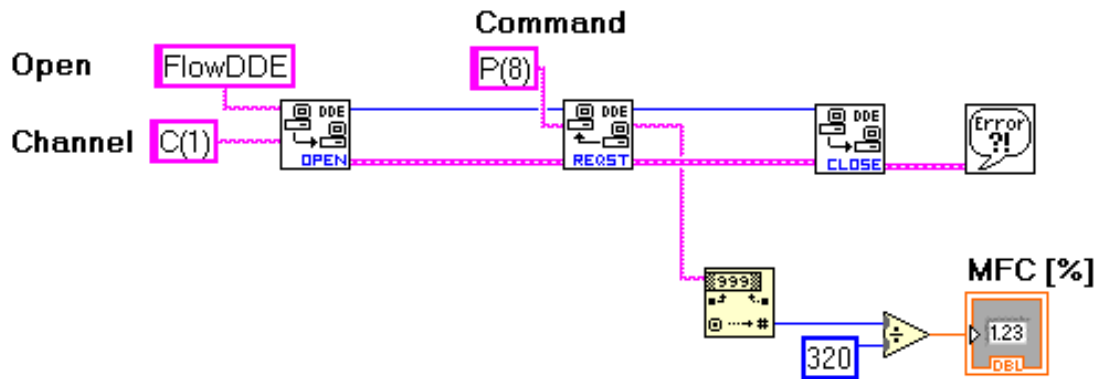


Abbildung 6.25: Programmmodul für die Kommunikation mit dem Bronkhorst Server Flow-DDE

Die beiden Beispiele haben aufgezeigt, wie die Prozessgrößen mit Hilfe der unterschiedlichen standardisierten Schnittstellen -Physikalische- und Softwareschnittstellen- in die Messdatenverarbeitung importiert werden können. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass die einzelnen Prozessgrößen nicht mehr fragmentiert, sondern als das zu messende Objekt betrachtet werden können. Die Prozessgrößen sind damit zentral für die weitere Analyse im Messsystem verfügbar.

Analyse der Messdaten

Die Analyse der Messdaten ist neben der Messdatenerfassung als das zentrale Modul bei den Gaswechsellmessungen zu sehen, wo Messdaten mit grundlegenden Funktionen (Linearisierung, Mittelwertbildung, Kalibrierung) sowie aufwendigen Verfahren analysiert werden. Dabei ist eine wichtige Zielsetzung, komplexe pflanzenphysiologische Zusammenhänge zu interpretieren.

Aufgrund der Bandbreite der Datenanalyse wird im folgenden nur auf die wichtigsten konzeptionellen Aspekte eingegangen.

- Bei allen analogen Messdaten vom PXI/SCXI-Datenerfassungssystem werden nach jedem Ereignis (Abtastung 10Hz, Ereignissteuerung 1Hz) der Mittelwert

und die Standardabweichung berechnet. Damit wird die Genauigkeit verbessert, und es kann gleichzeitig auch eine Aussage über die Stabilität des Eingangssignals gemacht werden.

- Für eine präzise Messung der Temperatur (Messdaten vom Verstärker für die Thermoelemente SCXI-1112) werden die Messfehler der Hardwarekomponenten berücksichtigt. Dies beinhaltet eine Korrektur der Offsetspannung der Messverstärker und eine CJC (*Cold Junction Compensation*) Kompensation [60, 61]. Beide Korrekturen werden funktional durch das SCXI-1112 Modul unterstützt. Aus den korrigierten Messdaten wird die Temperatur in Abhängigkeit von dem eingesetzten Typ (J,K,T,E,R,S,N,B) des Thermoelementes berechnet.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Last File >							G01 V298 Cal	12/13/2002
2									
3	0	1	2	3	4	5	6	7	8
4	Kanal	Kuerzel	Datum	a0	a1	a2	a3	a4	a5
5	0	Ce1	05-10-00 (D1)	-51,51780514	450,32459893	77,66345576	-1,75985753		
6	1	Ce2							
7	2	Cd	*	0,00000000	1,00000000				
8	3	---							
9	4	he	04-11-2002	9,11580630	10,05543766	1,19760990			
10	5	ho	04-11-2002	10,34927555	10,21690835	1,17779858			
11	6	te	06-09-00	-20,36412031	20,21152104				
12	7	to	06-09-00	-20,82548691	20,33794048				
13	8	tC	13-12-2002	0,25135038	40,18190450				
14	9	tS	13-12-2002	0,20471757	40,71365532				
15	10	tG	13-12-2002	-0,47152888	40,40649200				
16	11	tD	13-12-2002	0,73033300	40,72855271				
17	12	tD5	13-12-2002	1,01643040	40,12604568				
18	13	FM1	27-06-00	26,66845778	409,46465391				
19	14	---							
20	15	Pa1	27-06-00	822,84438068	74,89425992				
21	16	---							
22	17	Pd1	24-07-02	-326,71700618	65,50589701				
23	18	---							
24	19	---							
25	20	tKK	*06-09-00	0,00000000	5,00000000				
26	21	hKK	*06-09-00	0,00000000	10,00000000				
27	22	CG	18-09-00	-0,56257386	399,44587382				
28	23	eLC	04-07-02	-3,86637552	386,94710121				
29	24	---							
30	25	---							
31	26	---							
32	27	---							
33	28	---							
34	29	---							
35	30	(he*)	11/4/2002						
36	31	(ho*)	11/4/2002						
37	32	Ce1VP	26-10-00	14,30748959	1,02476324	-1,28170513	1,00277130	-0,93152207	23,24204246
38	33	Ce2VP							
39	34	Cd (a0)	03-11-00	0,08103550	0,00208449	0,00000004			
40	35	Cd (a1)		0,01387457	0,00047938	0,00001242	0,00000010		
41	36	HaClRcorr	date			LeakOS	date		
42	37								

Abbildung 6.26: Microsoft Excel Datei für die Kalibrierung der physikalischen Prozessgrößen

- Für die Kalibrierung der Prozessgrößen wird eine entsprechende Microsoft Excel Kalibrierungsdatei, wie sie in Abb. 6.26 dargestellt ist, importiert. Diese beinhaltet ein Kürzel für die Zuweisung des entsprechenden Messkanals, den Zeitpunkt der Spezifizierung der Koeffizienten und die Koeffizienten $a_0 \dots a_5$. Mit Hilfe dieser Tabelle besteht die Möglichkeit, aus den einzelnen Sensordaten die physikalische Prozessgröße mit einem Polynom 5ter Ordnung zu berechnen. Die erforderlichen Koeffizienten werden durch Einzelmessungen bestimmt oder sind durch die Spezifikationen der Sensoren vorgegeben. Das für diese Berechnungen erforderliche LabVIEW Programmmodul ist in Abb. 6.27 dargestellt. Die kalibrierten Messwerte werden mit Hilfe der LabVIEW Funktion *Formula Node* aus den Messdaten (Rohdaten) und den Para-

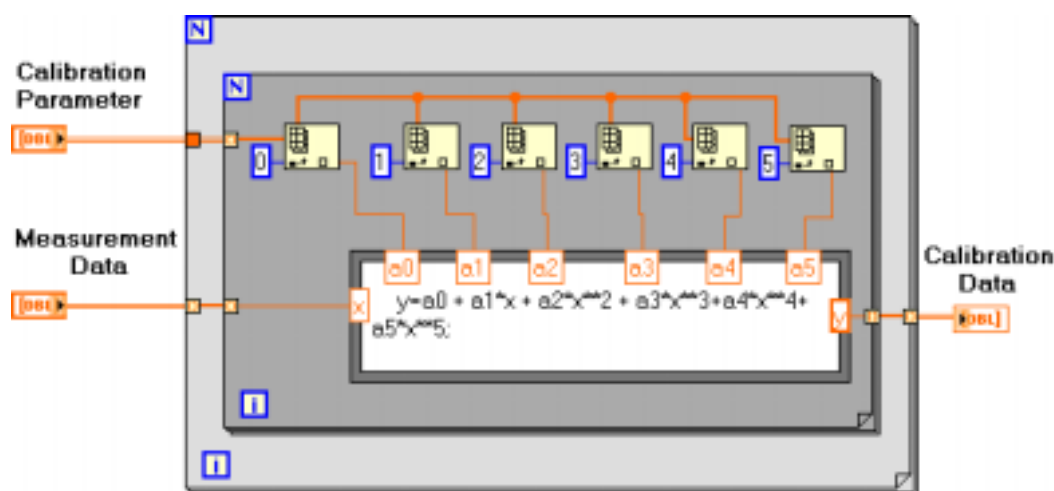


Abbildung 6.27: Programmmodul zur Auswertung der Microsoft Excel Datei für die Kalibrierung der physikalischen Prozessgrößen

metern der Kalibrierungsdatei berechnet.

Dieser Ansatz der Kalibrierung hat für den Anwender den Vorteil, dass Transparenz und Flexibilität des Experiments optimiert werden, sowie die Möglichkeit besteht, dass Messsystem neu zu konfigurieren ohne die Anwendersoftware zu modifizieren. Dieses bietet außerdem die Möglichkeit, Kalibrationskoeffizienten zu archivieren, um von denen und aus evtl. Abweichungen auf Änderungen bei den Messkomponenten zu schließen.

- Für die Auswertung eines Experimentes sind die Berechnungen der pflanzenphysiologischen Zusammenhänge wie z.B. CO_2 -Austauschraten oder Transpirationsraten notwendig. Die Abb. 6.28 zeigt das Programmmodul für die Berechnungen der Gaswechsellmessungen, die für eine *online* Interpretation des Experimentes notwendig sind. Die Voraussetzungen dafür stellt die Struktur des Messsystems (vgl. Abb. 6.20). Wie diese Berechnungen verdeutlichen, ist damit eine korrelierte Messdatenanalyse von unterschiedlichen Messkomponenten (z.B. PXI/SCXI-Messsystem und Licor-7000) gegeben und kann durch die

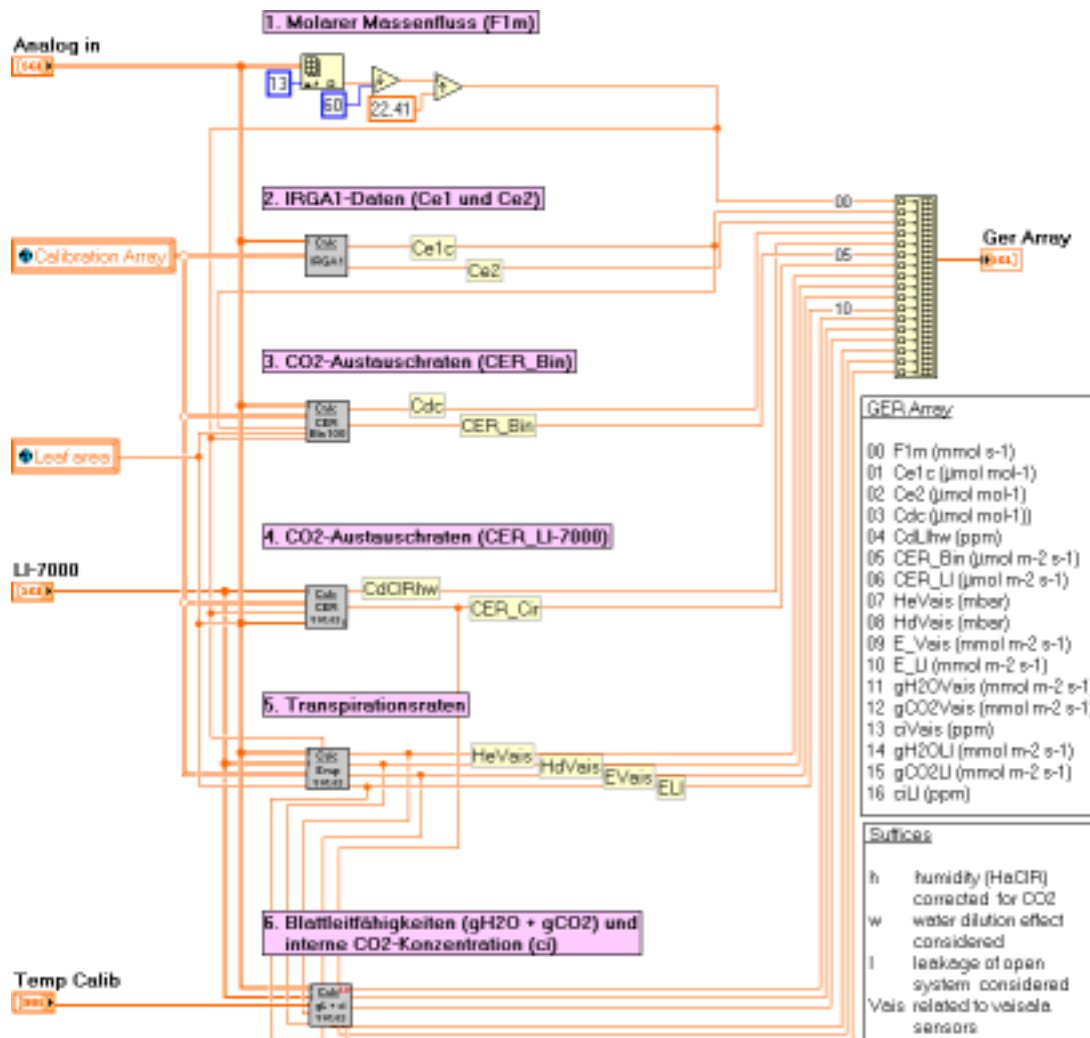


Abbildung 6.28: Programmmodul für die Berechnung der pflanzenphysiologischen Zusammenhänge bei den Gaswechsellmessungen

Struktur des Messsystems leicht erweitert werden z.B. durch zusätzliche Informationen aus der Bilddatenanalyse.

Die Berechnung einfacher mathematischer Zusammenhänge ist mit den grafischen Werkzeugen von LabVIEW über mathematische Einzelfunktionen oder über eine zeichenorientierte Darstellung (*Formula Node*) möglich. Für komplexere Berechnungen oder Algorithmen ist es effektiver, externe textbasierte Funktionsroutinen in Form einer DLL¹¹ einzubinden. LabVIEW verwendet dafür ein spezielles Blockdiagrammelement (*Call Library Function Node*), um eine DLL unter Windows aufzurufen. Sollte es erforderlich sein, konventionellen, textbasierten Quelltext in eine Applikation zu importieren, so kann das mit dem *Code Interface Node* realisiert werden. Der ausführbare Quelltext wird aufgerufen, wenn der Knoten ausgeführt wird, wobei Eingabedaten des Blockdiagramms an den externen Quelltext übergeben werden. Die von der externen Routine zurückgegebenen Daten werden an das Blockdiagramm übergeben. Analog ist die Technik der Datenübergabe auch bei dem Aufruf einer DLL.

Präsentation der Messdaten

Nach der Analyse der Prozessgrößen können neben den gemessenen Prozessgrößen auch die berechneten pflanzenphysiologischen Zusammenhänge dargestellt werden. Damit ist eine schnelle Interpretation der Versuchsdurchführung gegeben. Die eingesetzten Verfahren für die Präsentation und Archivierung der Prozessgrößen basiert auf grundlegenden Funktionen.

Der Anwender kann die Prozessgrößen mit Hilfe der Diagramm- (Chart) oder Graphen-Darstellung präsentieren. Bei der Chart-Darstellung können die Daten nach jedem Ereignis selektiv ausgewählt und mit dem entsprechenden Zeitbezug visualisiert werden. Damit besteht die Möglichkeit, den Ist-Zustand der Prozessgrößen zu überwachen.

¹¹DDL: **D**ynamic **L**ink **L**ibrarie. Eine DLL ist eine Bibliothek gemeinsamer Funktionen, die eine Applikation während der Ausführung einbinden kann, nicht während der Kompilierung.

Im Gegensatz dazu stellen Graphen Daten von bereits erzeugten Arrays in einem Zuge dar. Diese Darstellung wird eingesetzt, um die archivierten Daten zu präsentieren. Der Anwender kann einen Datenfile importieren und die entsprechenden Daten zur Visualisierung auswählen. Damit besteht die Möglichkeit, die zurückliegenden aufgezeichneten Messdaten zu kontrollieren.

LabVIEW stellt für die Diagramm- und Graphen-Darstellung die leistungsfähigen Funktionen *Waveform Chart* und *Waveform Graph* zur Verfügung. Mit Hilfe dieser beiden Funktionen kann die Applikation zur grafischen Darstellung effizient erstellt und flexibel konfiguriert werden.

Daten-Archivierung

Für die Archivierung der Daten wird eine filebasierte Datenbank Architektur eingesetzt. Die Tabelle 6.2 zeigt den Aufbau eines Datenfiles in der Datenbank. Archiviert werden der Zeitpunkt der Datenerfassung mit Datum und Uhrzeit, alle Rohdaten

Name Datenfile										
Metadaten										
Datum	Uhrzeit	Rohdaten				Berechnete Daten			Erweiterung	
3.08.03	10.23.40	4	10,4	2	...	7	10	2,2
3.08.03	10.25.20	1,1	8	3,02	...	3,08	11	2
...

Tabelle 6.2: Aufbau eines Datenfiles für die filebasierte Datenbank

(gemessenen Daten) sowie die aus den Messdaten berechneten Informationen. Die Position der Daten im File ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Die Steuerzeichen zur Trennung der einzelnen Spalten sind das *tab character* und für die Spalten das *end of line character*.

	Position	Länge
Datum	1	1
Uhrzeit	2	1
Rohdaten	3..50	47
Berechnete Daten	51..71	20
Erweiterung	72..	..

Tabelle 6.3: Position der Daten im archivierten Datenfile

Eine Identifikation der einzelnen Positionen ist über die im Datenfile vorhandenen **Metadaten**, welche in Abb. 6.29 dargestellt sind, gegeben. In diesem werden bei der Erstellung des Datenfiles zusätzliche Informationen über die archivierten Daten gespeichert. Aufgrund der Metainformationen und der ASCII¹²-Datei ist eine Auswertung des Datenfiles mit Standard Programmen wie z.B. Origin, SigmaPlot oder Microsoft Excel gegeben, welches bei dem Einsatz eines Relationalen Datenbankmodells nicht direkt möglich ist. Damit besteht die Möglichkeit einer erweiterten Datenanalyse oder Dokumentation der Messergebnisse.

¹²ASCII: **A**merican **S**tandard **C**ode for **I**nformation **I**nterchange. Mit ASCII wird ein Codierungsschema bezeichnet, das jedem Zeichen aus einem Zeichensatz eine eindeutige Nummer zuordnet. Zur Codierung werden 7 oder 8 Bits verwendet, wodurch bis zu 256 Zeichen (Buchstaben, Ziffern, Satzzeichen, Steuerzeichen und andere Symbole) dargestellt werden können. ASCII wurde 1968 mit der Intention entwickelt, Datenübertragungen zwischen divergierenden Hardware- und Softwaresystemen zu standardisieren. Mit der ASCII Darstellung wird in den meisten Minicomputern und in allen Personal Computern gearbeitet.

```
<Start-Metadaten>
//Kommentar
//Position          : Datentyp : Bezeichnung          : Einheit
Datum               : dd.mm.yy
Uhrzeit             : hh.mm.ss
Rohdaten [1]        : int16    : Durchfluss MFC1          :
Rohdaten [2]        : int16    : Temperatur Blattkammer :
.
.
Rohdaten [50]       : int16    : Druck Blattkammer      :
Berechnete Daten [1] : dbl     : CO2-Austauschraten    : mmol m-2 s-1
Berechnete Daten [2] : dbl     : Molarer Massenfluss    : mmol s-1
.
.
Berechnete Daten [20] : dbl     : Temperatur Blatt       : °C
Erweiterung
.
<Ende-Metadaten>

<Start-Daten>
.
.
.
<Ende-Daten>
```

Abbildung 6.29: Format der Metadaten für die filebasierte Datenbank

6.3.2 Translokationsmessungen

Das Grundkonzept für die Translokationsmessungen basiert auf dem Messverfahren, das im Kapitel *Grundlagen der pflanzenphysiologischen Messmethoden* (Kapitel 3) ausführlich erörtert wurde. Bei diesem Messverfahren werden mit Hilfe einer geeigneten Signalvorverarbeitung aus der γ -Strahlung einzelne Impulse erzeugt und mit einer entsprechenden Zählerstruktur (PXI-6602, vgl. Kapitel 6.1.4) detektiert. Die primäre Aufgabe des Softwaresystems ist es, die Zählerstände nach einem durch den Anwender definierten Zeitintervall auszulesen und zu analysieren.

Für eine Umsetzung dieser funktionalen Anforderung durch das Programmmodul für die Translokationsmessungen ist die Grundstruktur (siehe Programmstruktur für die Gaswechsellmessungen Abb. 6.20) konzipiert mit einer DAQ-ereignisorientierten Programmausführung, Erfassung, Analyse, Präsentation und Archivierung der Messdaten.

Das durch den Anwender zu definierende Messintervall für die Auswertung der Zählerstände wird mit Hilfe eines Hardwaretiming umgesetzt, also zu einem Gatesignal für die einzelnen Zähler des PXI-6602 Moduls. Dieses gemeinsame Gatesignal (Zeitintervall typ. 10 bis 60 sec), das der Anwender manuell oder über die MS Excel Tabelle vorgeben kann, wird zusätzlich für die DAQ-Ereignissteuerung ausgewertet.

Diese Vorgehensweise für die Konzeption der Translokationsmessungen führt zu den schon bei den Gaswechsellmessungen diskutierten Vorteilen hinsichtlich Genauigkeit der Messwerterfassung sowie einer minimalen Prozessorauslastung.

Eine Synchronisierung der Messwerterfassung in Bezug auf die Gaswechsellmessungen und des bildgebenden Messverfahrens erfolgt über den PXI-Triggerbus. Mit Hilfe dieser Bus-Struktur kann der Einsatz unterschiedlicher PXI-Module im Datenerfassungssystem synchronisiert werden [49, 48].

Die komplexen Analyseverfahren für Translokation sind ausführlich in der Literatur [37, 39] erläutert. Eine Präsentation und Archivierung der Messdaten geschieht

in Analogie zu den Gaswechsellmessungen.

6.3.3 Bildgebendes Messverfahren

Die Gaswechsel- und Translokationsmessungen basieren auf der im Kapitel *Grundlagen der pflanzenphysiologischen Messmethoden* (Kapitel 3) beschriebenen Gaswechselanlage und damit gekoppelten Messmethoden. Im Gegensatz dazu ist das bildgebende Messverfahren grundlegend neu zu konzipieren. Das Konzept dafür wird in dem Kapitel *Konzept für das bildgebende Messverfahren* (Kapitel 7) ausführlich aufgezeigt. Die Möglichkeit der Steuerung und Integration in das **GTPROZESSAS** ist in diesem Kapitel dargestellt worden.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden das Grundkonzept für das **GTPROZESSAS** und die Programmmodule für die Prozess-Steuerung und das Messsystem konzipiert. Dabei ist neben der Funktionalität die Modularität und Erweiterbarkeit ausführlich diskutiert worden. Im weiteren sind die wichtigsten Aspekte dahingehend zusammengefasst.

Das Hardwaresystem gewährleistet durch den Einsatz der standardisierten Schnittstellen und das flexibel konfigurierbare PXI/SCXI-System eine offene Struktur, durch die eine effektive Integration von Komponenten aus dem Bereich der Mess- und Automatisierungstechnik gegeben ist. Deutlich erweitert wird diese Grundstruktur mit der Möglichkeit, zusätzlich Echtzeitapplikationen auf dedizierter Hardware in Verbindung mit einem PXI/SCXI-Datenerfassungssystem oder FieldPoint-Modul einzusetzen. Dieser Aspekt öffnet das **GTPROZESSAS** für Applikationen aus dem Bereich der Regelungstechnik und ist damit eine wesentliche Erweiterungsmöglichkeit.

Für das Softwaresystem wird das Win32 Betriebssystem als Systemsoftware eingesetzt. Gerade mit der Entwicklungsumgebung LabVIEW gewährleistet diese Kombination zum momentanen Zeitpunkt einen breitbandigen Einsatz im Bereich des Hard- und Softwaresystems.

Die Struktur der Anwendersoftware eröffnet die Möglichkeit, einzelne Programmmodule für neue oder erweiterte Applikationen einzusetzen, aber auch eine leichte Transformation von Modulen auf weiteren Rechnersystemen. Dieses kann gerade in Bezug auf die rechenintensive Bilddatenanalyse von Vorteil sein.

Durch den Einsatz der Programmmodule für die Prozess-Steuerung kann der Anwender seine wissenschaftlichen Experimente effektiv planen und durchführen, und zwar mit der manuellen oder programmierten Steuerung. Dabei ist die programmierte Steuerung deutlich hervorzuheben. Mit deren Hilfe und einer Microsoft Excel-Steuerdatei sind komplexe Versuchsabläufe mit reproduzierbaren Versuchsbedingungen durchzuführen, ohne dass ein Eingriff in das Softwaresystem notwendig ist. Nicht nur die Flexibilität bezüglich der Versuchsdurchführung ist für den Anwender dabei gegeben, sondern auch die konzipierte Struktur der Microsoft Excel Tabelle ermöglicht eine schnelle Einarbeitung, eine effektive Erstellung der Versuchsdurchführung und eine leichte Erweiterung der Funktionalitäten.

Die Programmmodule für die Gaswechsel- und Translokationsmessungen beinhalten die grundlegenden Funktionen für die Erfassung, Analyse, Präsentation und Archivierung der physikalischen Prozessgrößen. Mit Hilfe der Ereignis-Steuerung ist eine periodische und synchrone Messwerterfassung der pflanzenphysiologischen Prozesse und des bildgebenden Verfahrens gewährleistet, welche je nach der wissenschaftlichen Fragestellung in ihren Anteilen kombiniert werden können. Gerade dieser Ansatz erlaubt es, pflanzenphysiologische Messmethoden mit einem bildgebenden Messverfahren zu kombinieren. Durch diesen Aspekt eignet sich das **GT_{PROZESSAS}** für eine leichte Transformation auf zukünftige Forschungsschwerpunkte.

7 Konzept für das bildgebende Messverfahren

Wie schon in dem Kapitel *Anforderungen an das bildgebende Messverfahren* (Kapitel 4.2.4) aufgezeigt wurde, sollen die pflanzenphysiologischen Messmethoden durch die Möglichkeit ergänzt werden, gleichzeitig ein optisches Messverfahren mit Hilfe der Bilderfassung einzusetzen. Dadurch können parallele Informationen in Bezug auf die morphologischen Größen z.B. Blattgeometrie oder Blattwachstum von Pflanzen verarbeitet werden. Damit kann schon während der Versuchsdurchführung eine Analyse der Messdaten durch das **GTPROZESSAS** erfolgen. Mit Hilfe der analysierten Blattfläche besteht z.B. die Möglichkeit der Interpretation von Photosyntheseraten *online*. Durch die Möglichkeit der Kombination dieser unterschiedlichen Messverfahren sind Perspektiven für die Untersuchung von neuen wissenschaftlichen Fragestellungen gegeben.

Die Analyse von Bildinformationen ist ein komplexer Prozess und erfordert eine Kombination grundlegender Bildverarbeitungsoperationen. Diese werden hier konkret auf die Detektion der Blattgeometrie - speziell auf die Berechnung der Blattfläche (vgl. Kapitel 7.3) - von Pflanzen angewandt. Dieser Anwendungsfall ist als Ergänzung zu den Gaswechsellmessungen zu sehen, da die Blattfläche als morphologische Größe in die Berechnung der Photosyntheserate bei Pflanzen eingeht (vgl. Kapitel 3.2.2).

Zu einem späteren Zeitpunkt soll das konzipierte bildgebende Verfahren auf weitere wissenschaftliche Fragestellungen (Fluoreszenzmessungen, Blattwachstum von Pflanzen uvm.) ausgeweitet werden. Dieser wesentliche Aspekt wurde bei der Konzeption berücksichtigt, da dass zu entwickelnde bildgebende Verfahren sowohl auf der Hardware- wie auch auf der Softwareebene als Grundlage dafür anzusehen ist.

7.1 Konzeption der Hardwareebene

In dem Kapitel *Aufbau des Hardwaresystems* (Kapitel 6.1.3) wurde ausführlich auf die Konzeption des Hardwaresystems für das **GTprozessAS** eingegangen. Ergänzend dazu werden im weiteren die spezifischen Hardwareeigenschaften für die Bildfassung bezogen auf die Auswahlkriterien der Kamera und des Objektivs, die Kommunikation mit dem **GTprozessAS** sowie die Modularität diskutiert.

Die primäre Anforderung beim Einsatz optischer Messverfahren ist die Auswahl eines geeigneten Sensors, in diesem Fall einer entsprechenden Kamera. Diese Auswahl basiert auf den Spezifikationen, welche sich aus den Messanforderungen für das Experiment ergeben. In dem Anwendungsfall der Bestimmung der Blattfläche kann dieses auch spezifiziert werden. Zum heutigen Zeitpunkt können jedoch keine konkreten Aussagen für zukünftige Experimente gemacht werden. Es kann sich die Notwendigkeit ergeben, z.B. durch Ersetzen der entsprechenden Kamera, die Bildfassung auf neue wissenschaftliche Fragestellungen, in denen vielleicht eine verbesserte Auflösung, höhere Genauigkeit oder veränderte Bildwiederholfrequenzen benötigt werden, anzupassen. Um dieses flexibel und effektiv umsetzen zu können, muss die Modularität der Bildfassung sicherstellen, dass ein breites Spektrum entsprechend einzusetzender Kamerasysteme für die konzipierte Softwarestruktur zur Verfügung steht. Die Zielsetzung bei einem Austausch der Kamera ist, eine schnelle Integration in die Softwarestruktur zu gewährleisten. Im folgenden wird ausführlich auf die Umsetzung dieser Zielsetzung eingegangen.

Grundlegend unterscheiden sich die heute eingesetzten Kamerasysteme hinsichtlich der Übertragungstechnik zwischen Kamera und Auswertesystem in analoge und digitale. Damit gekoppelt sind die spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Kamerasysteme, welche in der Tabelle 7.1 aufgeführt sind. Aus dieser Gegenüberstellung ist das breite Einsatzspektrum der digitalen Kamerasysteme zu erkennen. Dabei

	Digitalkamera	Analogkamera
Übertragungstechnik	digital	analog
Datenübertragung	wenig stör anfällig	anfällig gegenüber Rauschen und Interferenzen
Pixelauflösung	nur abhängig vom CCD Sensor	meist Standard-Größen (Video Normen)
Bildfrequenz	flexibel konfigurierbar	fest durch die Video Normen
Integrationszeit	flexibel konfigurierbar	fest
Bild-Synchronisation	über ein externes Trigger-signal oder intern durch die Applikation möglich	nicht möglich
Kommunikation	über Standard Schnittstellen oder Digitale Framegrabber	Analoge Framegrabber mit Digitalausgang erforderlich
Kosten	teuer	kostengünstig

Tabelle 7.1: Gegenüberstellung der spezifischen Eigenschaften einer Standard Digital- oder Analogkamera

sind bei den Eigenschaften der Digitalkameras besonders die hohe Pixelauflösung, das bessere Signal/Rausch-Verhältnis, die flexibel zu konfigurierende Bildwiederhol-frequenz und Integrationszeit im Vergleich zu den analogen Kamerasystemen hervor-zuheben. Da diese Eigenschaften auch für zukünftige Experimente als die primären Gesichtspunkte zu sehen sind, fundamentierte die weitere Konzeption auf der Basis eines digitalen Kamerasystems.

Für die Kommunikation mit dem Rechnersystem besteht bei einer digitalen Kamera die Möglichkeit, die Standard FireWire Schnittstelle (FireWire entspricht der IEEE 1394 Schnittstelle) einzusetzen. Diese Schnittstelle ist bei den aktuellen Rechnersystemen integriert oder kann kostengünstig nachgerüstet werden. Mit diesem Ansatz können die Kosten der teuren Digitalkameras zu den herkömmlichen analogen kompensiert werden, da der analoge Framegrabber entfällt. Damit wird zusätzlich eine gewisse Modularität erzeugt, da die Treiberebene - in diesem Fall LabVIEW zu der FireWire Schnittstelle - auch bei Austausch der Kamera beibehalten werden kann.

Begrenzt ist der Einsatz dieser Schnittstelle durch die in der Spezifikation vorgegebene Datenrate¹ von 400 MBit/s. Dieses ist jedoch für die pflanzenphysiologischen Experimente nicht als primär einzustufen, da die dafür notwendigen Bildwiederholfrequenzen im niederfrequenten Bereich (0,1..10Hz) liegen. In dem konkreten Experiment für die Blattflächendetektion wird die Digitalkamera A302f des Herstellers Basler² [62] eingesetzt.

Für Anwendungen der Bildverarbeitung aus dem Bereich der Flächendetektion hat die Auswahl des Objektivs einen direkten Einfluss auf die Messgenauigkeit. Aus diesem Grunde werden im weiteren einige Gesichtspunkte bezüglich der Auswahl eines geeigneten Objektivs erörtert.

Bei den normalen Objektiven bewirken Abstandsänderungen zwischen Objektiv und Objekt Größenänderungen der Abbildung in der Bildebene (CCD³-Sensor). Dies

¹Die Datenrate der Übertragung wird im wesentlichen bestimmt durch die Bildwiederholfrequenz multipliziert mit der Anzahl der Pixel des Sensors.

²Hersteller: Basler Vision Technologies, 22926 Ahrensberg

³Charge-Coupled Device CCD-Sensoren bestehen aus einem ein- oder zweidimensionalen Array von Speicherelementen. In dieser integrierten Schaltung sind die einzelnen Halbleiter-Bauelemente so miteinander verbunden, dass elektronische Ladungen mit Hilfe entsprechender Steuersignale von einem Element in das nächste transportiert werden können. CCD-Sensoren werden bevorzugt als hochauflösende optische Bauelemente in digitalen Kamerasystemen eingesetzt.

bedeutet, dass das Objekt größer erscheint, wenn es weniger weit vom Objektiv entfernt ist, und kleiner, wenn es weiter davon entfernt ist. Um Messfehler mit diesen Objektiven zu vermeiden, muss die Entfernung zwischen Objekt und Bildebene genau bekannt sein, da aus dem Bild keine Information bezüglich des Abstandes des Objektes bestimmt werden kann. Der Einsatz dieser Objektive erscheint aus den diskutierten Gesichtspunkten für einen experimentellen Einsatz nicht sinnvoll es sei den, dass zusätzlich ein Maßstab zur Validierung mit abgebildet wird.

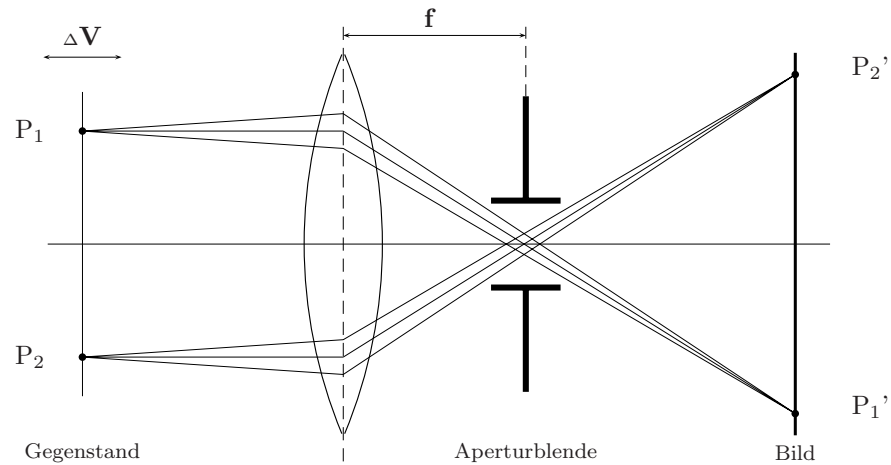


Abbildung 7.1: Telezentrische Abbildung der Gegenstandsebene auf die Bildebene, P_1 - P_2 : Gegenstandsebene, P_1' - P_2' : Bildebene, f : Brennweite der Linse, ΔV : Änderungen der Objektposition

Im Gegensatz zu den normalen Objektiven wird bei den telezentrischen (siehe Abb. 7.1) dieser Nachteil durch ein verändertes Abbildungssystem kompensiert. Dazu wird die Blende repositioniert vom bildseitigen Hauptpunkt zum bildseitigen Brennpunkt. Durch die Verlagerung der Blende in den Brennpunkt wird der Hauptstrahl, das ist der Strahl durch das Zentrum der Blende im Bildraum, im Objektraum parallel zur optischen Achse. Damit bewirken Änderungen in der Objektposition keine Größenänderungen in der Abbildung. Das Objekt wird natürlich um so unschärfer abgebildet, je weiter es von der scharf eingestellten Objektebene entfernt ist. Das Zentrum des Unschärfekreises ändert jedoch seine Position nicht, womit eine eindeutige Detektion der Objektkanten mit Hilfe einer geeigneten Software möglich ist.

Zusammenfassend stellen sich die Vorteile für den Einsatz eines telezentrischen Objektivs wie folgt dar: Größenkonstante Abbildung selbst schwieriger Formen, keine Größenkorrektur der Messergebnisse mehr durch Software, Messobjekt ist innerhalb großer Toleranzen frei positionierbar sowie geringe Empfindlichkeit gegenüber Streulicht durch den parallelen Strahlengang.

Der Nachteil telezentrischer Objektive ist der, dass der Durchmesser des Objektivs mindestens so groß wie das zu messende Objekt sein muss. Damit wird die präzise optische Vermessung großer Teile kostenintensiv. Dieser Aspekt ist jedoch für die Anwendungen der Blattflächendetektion nicht als wesentlich einzustufen, da die dort erforderlichen Objektfelder in den Bereichen von 90x120mm liegen und damit der Einsatz eines telezentrischen Standard Objektivs⁴ möglich ist. Weiterhin kann sich der geringe Arbeitsabstand (Linos Objektiv: 225mm +/-75mm) des Objektivs von dem Blatt nachteilig auswirken. Dadurch kann ggf. eine Beschattung des Blattes hervorgerufen werden, welche die Gaswechselprozesse beeinflusst.

7.2 Konzeption der Softwareebene

In dem Kapitel *Anforderungen an das bildgebende Messverfahren* (Kapitel 4.2.4) wurden die grundlegenden Kriterien für den Einsatz des bildgebenden Verfahrens erörtert. Im weiteren werden die Aspekte hinsichtlich der Konzeption für die Steuerung des Zeitpunktes der Bilderfassung sowie die funktionalen Aufgaben diskutiert, welche diesen Anforderungen gerecht werden.

⁴Hersteller ist z.B. Carl Zeiss Jena GmbH, 7740 Jena: Typ 150/8/0,1 Abbildungsmaßstab 1:18,75 [63] oder Linos AG, 37081 Göttingen: Typ TL 1/2-15-120 Abbildungsmaßstab 1:15 [64].

7.2.1 Grundkonzept

Ein wichtiger Aspekt bei der Bilderfassung ist die Möglichkeit, die Erfassung des Bildes zeitsignifikant zu steuern. Dazu wurde eine Steuerung integriert, die entweder eine kontinuierliche oder eine ereignisgesteuerte Bilderfassung erlaubt. In dem Modus der kontinuierlichen Bilderfassung kann die Bildwiederholfrequenz (Frames/s) flexibel konfiguriert werden entsprechend den Spezifikationen der eingesetzten Kamera. Dagegen können im Modus der Einzelbilderfassung die entsprechenden Ereignisse durch Anwenderinteraktionen in der Benutzeroberfläche, extern über die Microsoft Excel Tabelle sowie durch ein Triggersignal der Hardware vorgegeben werden. Damit ist eine externe Synchronisierung der Bilderfassung möglich. Grundlegend können in beiden Modi die Integrationszeit des Sensors und die Verstärkung im Rahmen der Spezifikationen der Kamera verändert werden.

Im ersten Ansatz soll die Bildverarbeitung synchron zu den Gaswechsel- und Translokationsmessungen eingesetzt werden. Dazu werden in beiden Modi die Bildwiederholfrequenz, Integrationszeit oder auch die Auslösung der Ereignisse für die Bilderfassung über die Excel Tabelle gesteuert. Mit dieser Vorgehensweise kann die Bildverarbeitung in das **GTprozessAS** als optisches Messverfahren integriert werden.

Für eine Optimierung hinsichtlich einer minimalen Prozessorzeit wurde auch bei dem bildgebenden Verfahren eine ereignisorientierte Datenerfassung konzipiert (vgl. Gaswechselmessungen). Dabei ist hier als Ereignis das Ende der Datenübertragung zwischen Kamera und Rechnersystem, das ist der Zeitpunkt, zu dem das neue Bild im Speicherbereich des Rechnersystems für die Analyse zur Verfügung steht, definiert. Der Vorteil dieser DAQ-ereignisgesteuerten Programmierung ist, dass keine Prozessorzeit erforderlich ist, solange auf das Ereignis gewartet wird. Gerade in Bezug auf die parallelen Strukturen des Messsystems und die rechenintensiven Auswertungen der Bildverarbeitung ist eine Optimierung der Einzelprogramme bezüglich einer minimalen Prozessorzeit von Vorteil.

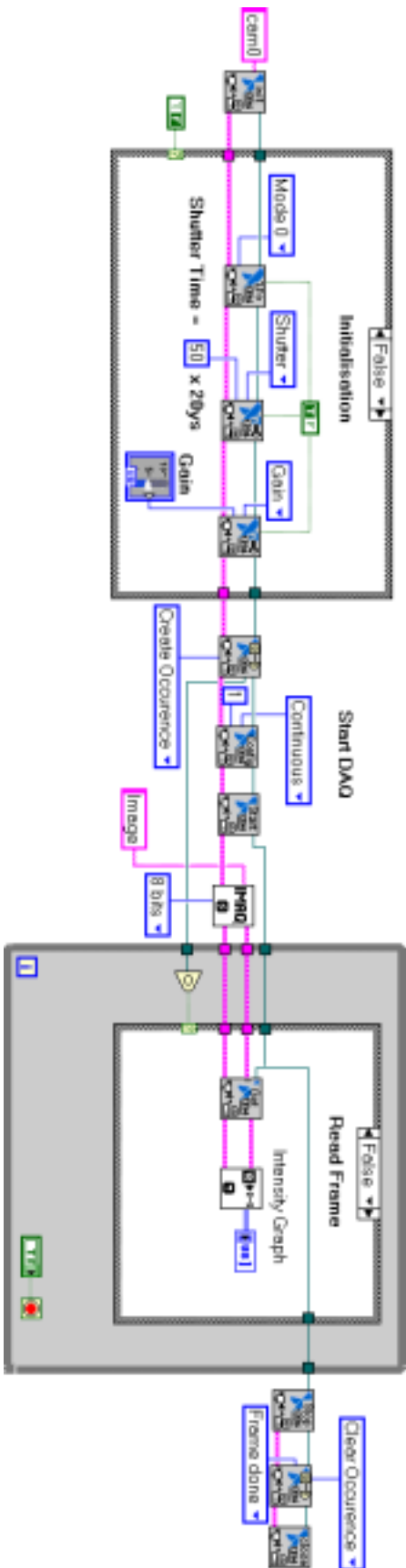


Abbildung 7.2: LabVIEW Programmmodul für die Digitalkamera fs302 mit externer Synchronisierung

In Abb. 7.2 ist das Programmmodul dargestellt für eine Einzelbilderfassung über einen Hardware-Trigger. Dafür wird die eingesetzte Digitalkamera initialisiert (fs 302: Mode 0) und die DAQ-Ereignissteuerung konfiguriert. Nach jedem Ereignis stehen dem Anwender die neuen Bildinformationen zur Verfügung und können so für eine weitere Analyse genutzt werden. Die leistungsfähigen IEEE 1394 Funktionen, welche dafür erforderlich sind, werden durch die Entwicklungsumgebung bereitgestellt und können für eine effektive Entwicklung der Applikation genutzt werden.

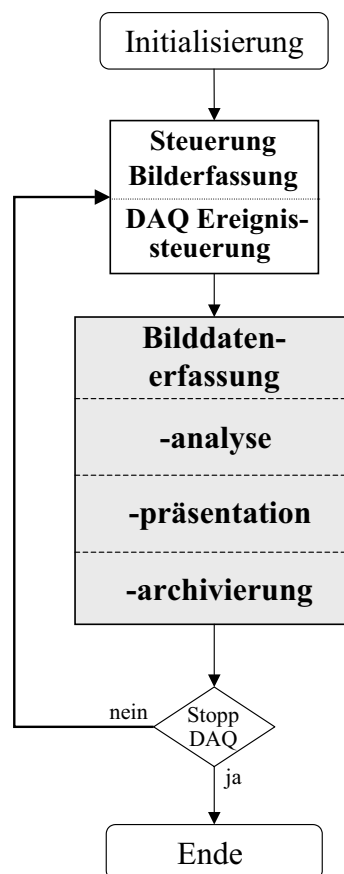


Abbildung 7.3: Struktur des Softwaremoduls für das bildgebende Messverfahren

7.2.2 Das bildgebende Verfahren

Die Aufgaben des Anwenderprogramms für das bildgebende Verfahren werden entsprechend der in Abb. 7.3 dargestellten Struktur nach der Funktionalität in die Bilddatenerfassung, -analyse, -präsentation und -archivierung aufgeteilt. Diese Einzelfunktionen sind modular aufgebaut, mit dem Ziel, einzelne Module leicht zu modifizieren oder auszutauschen und so das Programm effektiv auf neue Experimente anpassen zu können.

Bei den einzelnen Modulen differenziert sich die Bilddatenanalyse deutlich von den übrigen Modulen. In diesem Modul werden die vom Experiment abhängigen Fragestellungen an die Bildverarbeitung mit komplexen Analyseverfahren oder Algorithmen ausgewertet. Dadurch ist der Bilddatenanalyse eine wichtige Aufgabe in dem Modul zuzuordnen. Dies bedeutet in der Praxis, dass für weitere Experimente in der Regel nur dieses Modul modifiziert/ausgetauscht werden muss, da die Bilddatenerfassung, -präsentation und -archivierung auf allgemein verwendbaren Funktionen basieren. Weil die Bilddatenerfassung im Kapitel *Grundkonzept* beschrieben wurde, wird auf die Konzeption der Analyse, Präsentation und Archivierung der Messdaten im weiteren eingegangen.

7.3 Analyse der Bildinformation

Die Analyse der Bilddaten ist als das zentrale Modul anzusehen, wo Bildinformationen mit mathematischen Verfahren oder speziellen Algorithmen klassifiziert werden. Diese Klassifizierung differenziert sich immer deutlich in Abhängigkeit von der Zielsetzung der Bildanalyse.

Die Analyse der Bildinformationen ist als ein mehrstufiger Prozess zu betrachten. Eine Extraktion der Informationen aus einem Bild kann nur durch eine Kombination mehrerer grundlegender Bildverarbeitungsoperationen erfolgreich gelöst werden. Aus diesem Grund entsteht ein hierarchisches Schema, das in Abbildung 7.4 für den

konkreten Anwendungsfall der Blattflächendetektion dargestellt ist. Dieses Schema gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Phasen der Bildverarbeitung und zugleich eine Zusammenfassung der Punkte, die im weiteren ausführlich diskutiert werden.



Abbildung 7.4: Hierarchie der Bildverarbeitungsoperationen von der Bildvorverarbeitung bis zur Klassifizierung

7.3.1 Bildvorverarbeitung

Auf der ersten Verarbeitungsstufe, der Bildvorverarbeitung, können eine Reihe unterschiedlicher Operationen stehen. Dazu gehören eine etwaige Verbesserung der Helligkeit und des Kontrastes des Bildes. Eine übliche Aufgabe ist auch eine Koordinatentransformation zur Restaurierung geometrischer Störungen, die bei der Bildfassung entstehen können. Die für die Verbesserung/Eliminierung dieser Störungen benötigten Operationen können in zwei Klassen, nämlich Punktoperationen und geometrische Operationen eingeteilt werden. Die Punktoperationen [65, 66] modifizieren die Grauwerte einzelner Bildpunkte nur in Abhängigkeit vom Grauwert selbst und eventuell von der Position des Bildpunktes. Im Gegensatz dazu modifizieren geometrische Operationen [67] nur die Position eines Bildpunktes. Ein Bildpunkt wird von

der Position (\mathbf{x}, \mathbf{y}) an eine neue Position $(\mathbf{x}', \mathbf{y}')$ verschoben. Die Beziehung zwischen den beiden Koordinaten wird mit Hilfe geometrischer Abbildungsfunktionen beschrieben. Beide Korrekturen sind für die Bearbeitung von elementaren Störungen des Bilderzeugungsprozesses notwendig.

In welchem Umfang diese Operationen bei der Blattflächendetektion angewandt werden müssen, kann zum momentanen Zeitpunkt nicht gesagt werden. Diese Fragestellung kann für die Bildvorverarbeitung erst nach Fertigstellung des physikalischen Aufbaus abschließend beantwortet werden, da dieses von einer Anzahl von Faktoren wie optischer Aufbau, Lichtquellen u.a. abhängig ist.

Nachdem die Störungen, die durch den Bilderfassungsprozess entstanden sind, mit den aufgezeigten Operationen korrigiert sind und die Bildqualität optimiert ist, können die Merkmalsbilder extrahiert werden. Dabei ist die wesentliche Aufgabe, das Objekt Pflanzenblatt eindeutig zu identifizieren.

7.3.2 Merkmalsbilder

Eine Anzahl von Verarbeitungsschritten ist für die Analyse und Identifikation von Objekten - hier der Blattfläche - notwendig. Als erstes müssen geeignete Filteroperationen durchgeführt werden, um das interessierende Objekt von anderen Objekten und dem Bild-Hintergrund zu unterscheiden. Im wesentlichen werden dafür ein oder mehrere Merkmalsbilder extrahiert. Grundlegende Werkzeuge für diese Aufgabe sind Mittelung und die Kantendetektion.

Im einfachsten Fall wird das Objekt als Region konstanter Beleuchtungsstärke bzw. konstantem Grauwertes identifiziert. Durch die Mittelung erhalten wir repräsentative Mittelwerte der Grauwerte innerhalb des Objekts. Dieser Ansatz beinhaltet natürlich ein einfaches Modell des Bildinhalts und funktioniert nur, wenn das interessierende Objekt durch einen nahezu konstanten Grauwert charakterisiert ist. Dies ist jedoch bei der Blattfläche nicht zu erwarten. Dort ist schon aufgrund der Struktur des Pflanzenblattes mit variierenden Grauwerten zu rechnen. Hinzu können

noch weitere Effekte wie z.B. ungleichmäßige Beleuchtung oder auch Rauschen kommen, was diese Objekteigenschaften negativ beeinflusst. Um diese Bildeigenschaften zu kompensieren, mit der Zielsetzung, durch eine Kantendetektion das Objekt eindeutig zu identifizieren, werden im ersten Schritt Mittelungs- oder Glättungsfilter eingesetzt [68]. Dabei sind wesentliche Kriterien an diese Operationen zu stellen: Verschiebefreiheit, Isotropie und Erhaltung des Mittelwertes. Unter Verschiebefreiheit ist zu verstehen, dass durch Einsatz dieser Operationen die Objektposition nicht verändert wird. Jede Verschiebung bei der Bildvorverarbeitung würde zu Fehlern bei der anschließenden Positionsbestimmung und eventuell bei der Berechnung anderer geometrischer Eigenschaften des Objekts führen. Die Isotropie beinhaltet, dass die Glättung in allen Richtungen gleich ist und somit richtungsunabhängig.

Eine große Gruppe von Filterfunktionen, die diese Voraussetzungen erfüllen, sind die 2D-Rechteckfilter, welche für diese Anwendung eingesetzt werden. Die Methode besteht darin, alle Bildpunkte innerhalb der Filtermaske zu addieren und die Summe durch die Anzahl der Pixel zu teilen. Dazu können die Koeffizienten (3x3, 5x5, 7x7, 9x9) des Algorithmus, das ist die Anzahl der Elemente in der Filtermaske, variiert werden. Die Abb. 7.5 verdeutlicht den Einsatz eines 2D-Rechteckfilters mit 3x3 Koeffizienten zur Optimierung hinsichtlich homogener Grauwerte innerhalb des Objekts.

Für die Simulationsrechnungen war die Grundlage ein Weissdornblatt mit einer Auflösung des Grauwerts von 8 Bit und einer ROI⁵ von 190 mal 220 Bildpunkten. Dieses Blatt charakterisiert sich durch unregelmäßige Blattkonturen und ist daher für die Simulationsrechnungen mit den eingesetzten Operationen geeignet, da diese sicherlich direkt auch auf homogene Blattkonturen (z.B. Tabakpflanze) anzuwenden sind.

Dieser erste Ansatz verdeutlicht, dass mit Hilfe dieser leistungsfähigen Rechteckfilterfunktion das Objekt mit näherungsweise konstanten Grauwerten charakteri-

⁵ROI: **R**egion of **I**nterest. Die ROI definiert einen rechteckigen Bereich innerhalb eines Bildes, welcher für die weitere Bildanalyse relevant ist.

siert werden kann und damit die Möglichkeit einer eindeutigen Objektextrahierung über die Kantendetektion gegeben ist. Eine große Anzahl weiterer Glättungs- oder Filterfunktionen wie Binomial- oder Medianfilter sind für spezielle Anwendungen verfügbar. Sie werden in der Literatur [69, 70, 71] beschrieben.



Abbildung 7.5: Links: Original-Darstellung einer *Acer pseudo platanus* (dt. Bez. Bergahorn), rechts: Simulationsrechnung bei den Einsatz eines 2D-Rechteckfilters mit 3x3 Koeffizienten für eine Optimierung hinsichtlich homogener Grauwerte innerhalb des Objekts

Für die Extrahierung des Objekts und damit zur Erzeugung des Merkmalsbildes ist eine Kantendetektion erforderlich. Diese Operation muss Veränderungen erkennen und Bereiche konstanter Grauwerte (Blattfläche) unterdrücken. Auf diese Weise wird ein Merkmalsbild erzeugt, in dem Veränderungen hell erscheinen, während alle anderen Bereiche dunkel bleiben.

Alle Verfahren für die Kantendetektion basieren auf Ableitungsfunktionen. Während Glättungsfilter Bereiche konstanter Grauwerte verstärken, müssen bei der Detektion von Kanten Operationen eingesetzt werden, die Grauwertveränderungen verstärken und Bereiche konstanter Grauwerte unterdrücken. Alle Funktionen, welche diese Eigenschaften aufweisen, sind Ableitungsoperatoren. Werden diese Funktionen

zur Kantendetektion eingesetzt, so hat die erste Ableitung an einer Kante ein Maximum oder ein Minimum, die zweite einen Nulldurchgang im Wendepunkt. Beide Kriterien werden zur Kantendetektion herangezogen. Wie schon bei den Glättungsfaktoren aufgezeigt, werden auch an die Operationen für die Detektion der Kante die Anforderung an Verschiebefreiheit und Isotropie gestellt, d.h. Kanten werden in allen Richtungen gleich gut erkannt und es kommt zu keiner fehlerhaften Bestimmung der Kantenrichtung. Verfahren, welche die geforderten Kriterien erfüllen, sind die regularisierten Kantendetektionsverfahren [72]. Bei diesen Verfahren beinhaltet das Differenzfilter zusätzliche Glättungseigenschaften, womit eine deutliche Verbesserung der Gradientenbestimmung von diskreten Signalen erzielt wird. Die Abbildung 7.6 verdeutlicht den Einsatz eines solchen Verfahrens mit dem Sobel-Algorithmus [73]



Abbildung 7.6: Links: Blattdarstellung nach der Simulationsrechnung mit einem Rechteckfilter als Filteroperation, rechts: Simulationrechnung mit dem Sobel-Verfahren für die Detektion der Blattrande

für die Kantendetektion. Dieser Sobel-Kantendetektor ist leistungsfähig in dem Bereich der diskreten Signalverläufe durch die zusätzlichen Glättungseigenschaften und wird für die Simulationsrechnungen eingesetzt.

Nach der Kantendetektion muss das Objekt als eindeutig segmentiert werden, damit bei der Klassifizierung die Eigenschaften des Objekts - die Blattfläche - bestimmt werden kann.

7.3.3 Segmentierung

Die Zielsetzung bei der Bildsegmentierung besteht darin, das Bild in verschiedene Regionen zu unterteilen, wobei jede Region bestimmte Eigenschaft besitzt. In einem segmentierten Bild sind die elementaren Bildelemente keine Einzelpixel mehr, sondern eine verbundene Menge von Pixeln, die derselben Region angehören. Ist das Bild erst einmal segmentiert, so kann jede Region ausgewertet werden, aber auch die Beziehungen zwischen den einzelnen Regionen charakterisiert werden. Bildsegmentierung spielt daher eine Schlüsselrolle bei der quantitativen Auswertung der Bilddaten. Die dafür erforderlichen Verfahren beruhen auf Nachbarschaftsoperationen, den morphologischen Operationen für Binärbilder⁶, mit denen sich die Form von Objekten analysieren und modifizieren lässt. Die komplexen Zusammenhänge der Morphologie, deren Grundlagen auf der Mengentheorie und Topologie basieren, werden hier nicht angesprochen, sondern auf die Literatur [74, 75, 76] verwiesen.

Für die konkrete Aufgabe der Detektion der Blattfläche stellt eine Segmentierung des Objekts vom Bild-Hintergrund, d.h. die Regionen konstanter Merkmale und Diskontinuitäten die Möglichkeit das Objekt eindeutig zu identifizieren dar. Dieses ist nur dann eine einfache Aufgabe, falls sich das Objekt klar vom Hintergrund unterscheidet. Ist dieses nicht der Fall, dann sind aufwendige Segmentierungstechniken [77, 78] erforderlich. Sie benutzen verschiedene Optimierungsstrategien, um eine minimale Abweichung zwischen den Bilddaten und einem gegebenen Modell, in dem das Wissen über die Objekte im Bild einfließt, zu erreichen.

Bezogen auf die Anwendung der Detektion der Blattfläche ist dieses relativ einfach, da die Original-Darstellung des Pflanzenblattes (siehe Abb. 7.5 links) einen

⁶In einem Binärbild wird jedem Pixel entweder eine 1 oder 0 zugewiesen.

homogenen Hintergrund aufweist und dadurch das Objekt einfach zu identifizieren ist. In der Praxis ist dies nicht zu erwarten, da bei einem konkreten experimentellen Aufbau mit einem Hintergrund d.h. mit weiteren Objekten zu rechnen ist und daher Optimierungsstrategien mit großer Sicherheit eingesetzt werden müssen. Es ist daher sinnvoll, schon bei der Bilderfassung zu versuchen, eine Optimierung bezogen auf den Bild-Hintergrund zu erzielen und damit die Komplexität der Bildanalyse zu minimieren.

Für die weitere Analyse werden die schon angesprochenen morphologischen Operatoren benötigt, damit eine Klassifizierung durchgeführt werden kann. Diese Operatoren sind nur auf ein Binärbild anzuwenden. Da das von der S/W-Kamera erfasste Bild immer ein Grauwertbild⁷ ist, muss eine morphologische Bildtransformation - eine sogenannte Bild-zu-Bild-Transformation - durchgeführt werden. Eine sehr weit verbreitete und einfache Bild-zu-Bild-Transformation ist die Binarisierung oder der Schwellwertoperator, der alle Pixel des Eingangsbildes, die in einem vorgegebenen Bereich von Grauwerten liegen, auf den Wert 1 und die verbleibenden auf den Wert 0 abbildet. Die Abb. 7.7 zeigt das zuvor mit dem Kantendetektionsverfahren analysierte Bild, das mit Hilfe des Schwellwertoperators in ein Binärbild transformiert wurde. Deutlich zu erkennen ist in der rechten Abbildung die Blattkontur, deren Breite der Ableitungsfunktion entspricht, mit dem Wendepunkt der Kante als Zentrum.

Durch die Binarisierung ist eine Mustererkennung oder Formanalyse möglich. Dazu werden Methoden für die Extraktion von Merkmalen eines Objektes benötigt. Die dafür eingesetzten Operationen fundamentieren auf dem Verdünnen eines Objektes, um idealisierte dünne Linien zu setzen, die die Form des Originalobjektes darstellen, während ihre Homotopie erhalten bleibt. Die daraus resultierenden Linien werden Skelett oder Mittelachse des Eingangsmusters genannt. Die entsprechenden Transformationen werden als Skelettierung- oder Mittelachsentransformationen [79, 80] bezeichnet. Eine Detektion von Endpunkten, Mehrfachpunkten und geschlossenen

⁷Der Wertebereich der Pixel des Grauwertbildes ist nicht auf die Werte der Menge $[0,1]$ beschränkt, sondern auf eine endliche Menge von nichtnegativen ganzen Zahlen, welche auf der Quantisierung der Bilderfassung basieren.

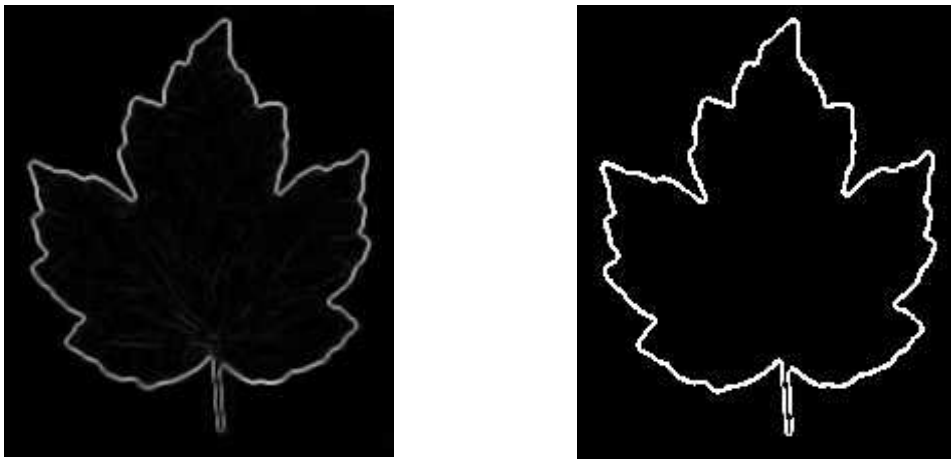


Abbildung 7.7: Links: Darstellung nach der Simulationsrechnung mit dem Sobel-Verfahren für die Kantendetektion, rechts: Binarisierung des Bildes mit dem Schwellwertoperator

Schleifen eines Skeletts ist die Grundlage für die vielen Formerkennungsverfahren.

Die Skelettierung lässt sich auch auf diskrete Mengen ausweiten. Jedoch ist dabei zu beachten, dass die diskrete Skelettlinie nicht unendlich dünn ist, da sie eine Stärke von mindestens einem Pixel besitzt. Die dafür eingesetzten Transformation wird homotopische Markierung genannt und beruht auf der Berechnung einer Mittelachse von dem Skelett einer Menge. Neben den zahlreichen weiteren Skelett Operationen wie Öffnungen [81], maximale Scheiben [82] oder Distanzfunktionen [83] liegt das Anwendungsgebiet der homotopischen Markierung [82] bei der Bestimmung der Formbeschreibung und ist daher geeignet für den Einsatz zur Detektion der Blattkonturen.

In der Abbildung 7.8 ist diese Operation auf das Originalbinärbild angewandt worden. Die rechte Abbildung verdeutlicht das Ergebnis dieser Transformation mit einer signifikanten Blattkontur, welche aus der ursprünglichen Blattrande detektiert wurde. Zusätzlich zu der Skelettierung wurde die Operation der morphologischen Schließung [84, 85] eingesetzt, mit dem Ziel, kleine Löcher und Risse in der Blattkontur zu be-

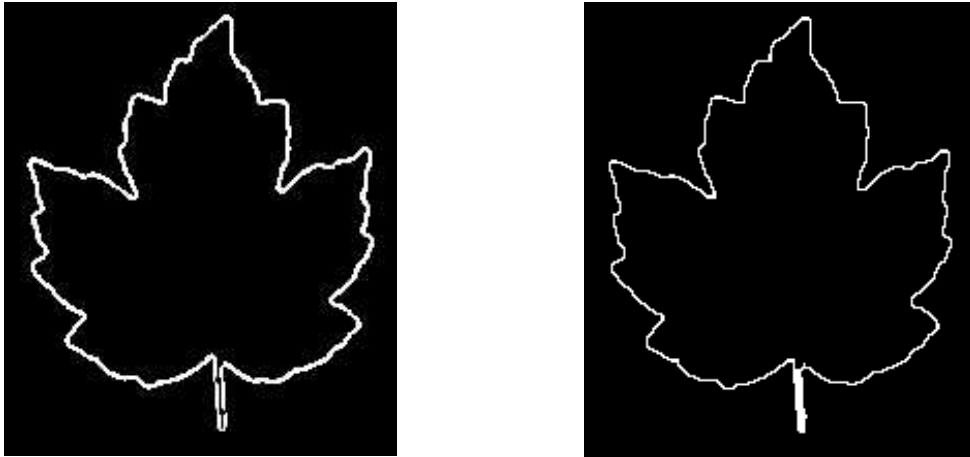


Abbildung 7.8: Links: Darstellung nach der Bild-zu-Bild-Transformation, rechts: Formanalyse des Pflanzenblattes durch Skelettierung und nachfolgender morphologischer Schließung

seitigen. Dieses bewirkt eine Schließung des Objektes, welches eine Grundlage für die Klassifizierung ist.

7.3.4 Klassifizierung

Durch die Segmentierung ist die Form des Objektes extrahiert. Bei der Klassifizierung können nun morphologische Operatoren eingesetzt werden, um die Form zu analysieren und zu verändern oder weitere Parameter wie den mittleren Grauwert, die Fläche, den Umfang oder andere Formbeschreibungen des Objektes zu ermitteln. Diese Parameter können dann benutzt werden, um Objekte zu klassifizieren.

Für die Anwendung auf das konkrete Experiment ist der Formparameter die Fläche. Bei einem diskreten Binärbild ist eine Fläche durch die Anzahl der Bildpunkte gegeben, die zu dem Objekt gehören. Bei der Matrix oder Pixeldarstellung des Objektes bedeutet daher eine Flächenbestimmung eine einfache Zählung der Pixel. Für einige der zur Flächenbestimmung eingesetzten Verfahren ist vor der Anwendung noch eine einfache Fülloperation durchzuführen. Die Abb. 7.9 verdeutlicht

diese Operation angewandt auf das skelettierte und geschlossene Pflanzenblatt.

Die Berechnung der Fläche ist mit dem Verfahren der Kettenkodierung [86, 87] durchgeführt worden. Der Algorithmus arbeitet ähnlich einer numerischen Integration, ist jedoch weit schneller als bei der Pixelzählung. Die mit diesem Verfahren

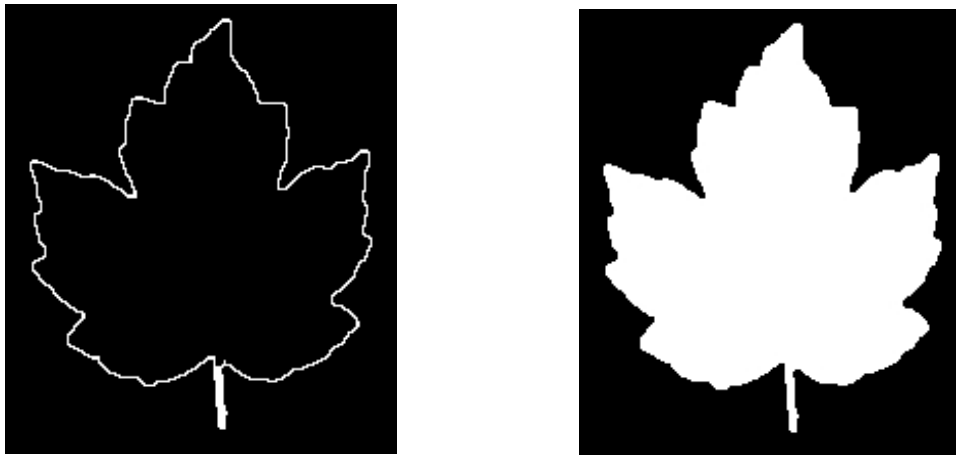


Abbildung 7.9: Links: Skelettiertes und morphologisch geschlossenes Pflanzenblatt, rechts: Die Darstellung zeigt die Fläche des Pflanzenblattes nach der Fülloperation. Diese Fläche wird bei der Berechnung durch das numerische Verfahren der Kettenkodierung berücksichtigt.

berechnete Fläche muss kalibriert werden mit der Pixelgröße des eingesetzten CCD-Sensors (z.B. Digitalkamera A302f von Basler Vision Technologies: Sensortyp Sony ICX075AL/AK-1/2 inch, Pixelgröße $8,3 \mu\text{m} \times 8,3 \mu\text{m}$) und dem Abbildungsmaßstab (z.B. Telezentrisches Objektiv von Carl Zeiss Jena Typ 150/8/0,1: Abbildungsmaßstab 1:18,75) des telezentrischen Objektivs. Eine Validierung der eingesetzten Analyseverfahren und Kalibrierung kann über ein definiertes Flächenelement (Rechteck, Kreis), welches heutzutage mechanisch mit einer ausreichenden Genauigkeit angefertigt werden kann, erfolgen.

Mit der Erfassung und Beschreibung der Form detektierter Objekte mit entsprechenden Operatoren ist die Bildverarbeitung für einige Aufgabenstellungen beendet, für andere nicht. Das hängt im wesentlichen von der Fragestellung an die Bildverar-

beitung ab. Dieser Unterschied lässt sich am besten an einem praktischen Beispiel erläutern.

Viele Anwendungen der Bildverarbeitung beschäftigen sich mit der Analyse der Formparameter wie Fläche, Umfang oder Form von Objekten. Mit den diskutierten Methoden können diese Formparameter detektiert und die entsprechenden Fragestellungen beantwortet werden. Zum Beispiel kann das Blattwachstum aufgezeichnet und ausgewertet werden. Diese Vorgehensweise ist für eine ganze Reihe wissenschaftlicher Anwendungen typisch. Sie ist dadurch charakterisiert, dass die zu untersuchenden Parameter eindeutig und unmittelbar aus den Bildinformationen abgeleitet werden können, wie es beispielhaft bei der Berechnung der Fläche des Pflanzenblattes aufgezeigt wurde.

Die Klassifizierung kann jedoch deutlich weiter gehen. Bei komplexen Anwendungen ergibt sich die Notwendigkeit, verschiedene Objektklassen wie z.B. unterschiedliche Formen in einem Bild zu differenzieren. Die Zuweisung von Objekten zu bestimmten Klassen ist - wie viele andere Aspekte der Bildverarbeitung und -analyse - ein interdisziplinäres Problem und nicht spezifisch für die Bildanalyse. In diesem Zusammenhang ist die Bildanalyse ein Teil des allgemeinen Forschungsgebietes. Im weiteren wird noch auf die grundlegenden Funktionen für die Präsentation und Archivierung der Bilddaten eingegangen.

7.4 Präsentation der Bilddaten

Bei der Präsentation können sowohl die gemessenen wie auch die analysierten Bilddaten über eine 2-dimensionale Falschfarben-Darstellungen visualisiert werden. Bei dieser Darstellungsart werden die Dimensionen von Daten (x, y und Helligkeit) in einem 2D-Intensitätsgraphen angezeigt. Dabei entspricht der dritten Dimension die farbliche Zuordnung. Mit einer Farbskala kann eine Zuweisung der Farben zu den Zahlenwerten vorgenommen werden.

7.5 Archivierung der Bilddaten

Die Zielsetzung bei der Bilddatenarchivierung ist, die aufgenommenen Messdaten in einem geeigneten Datenformat zu speichern und damit für eine erweiterte Datenanalyse oder Dokumentation zur Verfügung zu stellen. Dazu können die Bilddaten in den üblichen Grafikformaten BMP (Bitmap), JPG (Joint Photographics Experts Group), PNG (Portable Network Graphics Format) oder TIF (Tagged Image File Format) abgespeichert werden, die von den gängigen Grafikprogrammen unterstützt werden. Hinsichtlich der Anwendung der einzelnen Formate wird auf die umfangreiche Literatur [88, 89] verwiesen.

Zusammenfassung

Es wurde für die Hardwareebene ein Konzept für das bildgebende Verfahren konzipiert, welches primär die Flexibilität der digitalen Kamerasysteme für den Einsatz in unterschiedlichen wissenschaftlichen Experimenten berücksichtigt. Dabei ist die Kommunikation mit dem Rechnersystem über die FireWire Schnittstelle als eine schnelle und kostengünstige Integrationsmöglichkeit von neuen Kamerasystemen zu sehen, da eine Vielzahl von Herstellern (z.B. Basler, JVC, Sony) diesen Standard unterstützt.

Durch den modularen Aufbau der Softwareebene kann das Anwenderprogramm modifiziert und effektiv auf neue wissenschaftliche Fragestellungen angepasst werden. Mit den umfangreichen Steuerungsmöglichkeiten ist das bildgebende Verfahren leicht in ein Gesamtkonzept zu integrieren und zu steuern. Damit besteht die Möglichkeit, dieses als Ergänzung oder als unabhängiges Verfahren einzusetzen.

Die Analyse der Bildinformation für den konkreten Anwendungsfall der Blattflächendetektion hat verdeutlicht, dass dieses nur durch eine Kombination von Bildverarbeitungsoperationen gelöst werden kann. Dabei differenziert sich der Lösungsweg für die Klassifizierung immer deutlich von der Fragestellung an die Bildverar-

beitung.

Zusammenfassend kann jedoch gesagt werden, dass eine Extraktion von Bildinformationen in der Regel immer nur mit großem Aufwand und teilweise analytisch zu lösen ist. Selbst die im ersten Ansatz als einfach zu lösende Berechnung der Blattfläche gestaltet sich bei genauerer Betrachtung der Randbedingungen als sehr aufwendig und rechenintensiv.

8 Einsatz des **GTPROZESSAS**

Bestandteil der laufenden Forschungstätigkeit an dem Institut für Botanik/Pflanzenphysiologie der Universität Duisburg-Essen ist u.a. die Untersuchung des lateralen Gasflusses in den Blattinterzellularen, welche die Gasräume im Inneren der Blätter darstellen. Anhand dieser wissenschaftlichen Fragestellung aus dem Bereich der Gaswechsellmessungen wird die Bandbreite für den Einsatz des **GTPROZESSAS** exemplarisch aufgezeigt.

Neben den eingesetzten Standardverfahren bei Gaswechsellmessungen [8], welche auch mit kommerziellen Geräten [90] durchzuführen sind, lassen sich durch den Einsatz des **GTPROZESSAS** zusätzlich auch spezifische Anforderungen aus dem Bereich der Pflanzenphysiologie beantworten. Dieses wird in diesem Kapitel an der Fragestellung des Einflusses der lateralen Diffusion in den Blattinterzellularen sowie eines Druckgradienten zwischen Blattkammer und der umgebenden Atmosphäre auf den Gaswechsel diskutiert.

Für die Durchführung dieser Experimente bietet das **GTPROZESSAS** ideale Voraussetzungen. Die äußeren Einflüsse der Gaswechselprozesse, in diesem konkreten Anwendungsfall der Druck innerhalb der Blattkammer sowie die CO₂-Konzentration inner- und außerhalb der Blattkammer, können gesteuert und damit die physikalischen Prozessgrößen reproduzierbar beeinflusst werden. Eine wichtige Basis dafür stellt die Microsoft Excel Steuerdatei (vgl. Kapitel 6.2.5), welche für die Durchführung der beiden Experimente eingesetzt wurde, dar.

8.1 Gaswechsellmessungen an homo- und heterobarischen Blättern

Aufgrund der Komplexität der Fragestellung werden im weiteren nur die wesentlichen Aspekte des Gaswechsels bei homo- und heterobarischen Blättern, in Bezug auf eine laterale Diffusion und den druckabhängigen Massenfluss in den Blattinterzellularen, diskutiert.

8.1.1 Begriff homo- und heterobarisches Blatt

Der Begriff *homobarisches* bzw. *heterobarisches* Blatt wurde von Neger [91, 92] geprägt. Neger beschreibt homobarische Blätter als solche, deren Interzellularenräume in Verbindung stehen. Blätter des heterobarischen Typus besitzen dagegen stark kompartmentierte Blattinterzellularen. Der Unterschied zwischen homobarischen und heterobarischen Blättern ist in Abb. 8.1 schematisch dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass bei *Vicia faba* (dt. Bez. Saubohne) (Abb. 8.1 (a)) ein Leitbündel keine Barriere für laterale Gasdiffusion darstellt, da die Leitbündel keine Bündelscheidenerweiterung aufweisen. Bei *Glycine max* (dt. Bez. Sojabohne) (Abb. 8.1 (b)) sind dagegen die Leitbündel von Bündelscheidenzellen umgeben, die von der oberen bis zur unteren Epidermis reichen. Diese Bündelscheidenerweiterungen sind interzellularenfrei und stellen somit eine Barriere für laterale Gasdiffusion dar [93].

Glycine max und *Phaseolus vulgaris* (dt. Bez. Stangenbohne) werden als Pflanzen mit heterobarischen Blättern eingeordnet, *Nicotiana tabacum* (dt. Bez. Tabak) und *Vicia faba* weisen hingegen homobarische Blätter auf [94]. Die unterschiedliche Blattanatomie kann aber eindeutig zu Messartefakten [29] bei der Gaswechsellmessung führen. Diese Messartefakte beruhen auf lateralen Diffusionsvorgängen oder einem druckabhängigen Massenfluss in den Blattinterzellularen. Im weiteren wird auf den Einfluss dieser Artefakte ausführlich eingegangen.

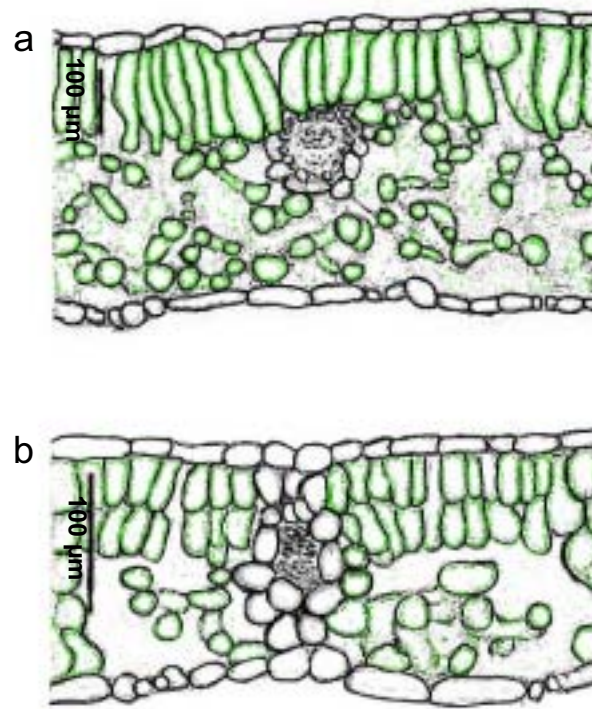


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung der Querschnitte von homobarischen (a) und heterobarischen (b) Blättern, (a): *Vicia faba* mit einem Leitbündel im Querschnitt, (b): *Glycine max* mit einem Leitbündel und der Leitbündelerweiterung im Querschnitt

8.1.2 Wissenschaftliche Fragestellung

Die Gaswechselfmessung an Blättern erfolgt meistens dadurch, dass nur ein Teil des intakten Blattes in eine Blattkammer eingespannt wird, da eine konventionelle Blattkammer in der Regel eine relativ kleine Fläche (20 x 30 mm) besitzt, so dass nur kleine Blätter im Ganzen eingespannt werden können [90]. Mit Hilfe der Blattkammer wird der CO₂-Austausch des im Inneren der Kammer befindlichen Blattteils gemessen (vgl. Abb. 3.1).

Wenn aber, wie bei homobarischen Blättern, die Blattinterzellularen eine Verbindung zwischen der Systemluft der Gaswechselanlage und der äußeren Gasatmosphäre

darstellen, so kann eine laterale Diffusion durch das Blatt entstehen. Dieser Gasfluß ist dann in erster Linie von der Größe der verbundenen Blattinterzellularen und vom Gasgradienten abhängig. Aufgrund der Blattanatomie dürfte dagegen bei einem heterobarischen Blatt kein Einfluss der äußeren Atmosphäre auf die Gaswechsellmessung zu erwarten sein.

Weiterhin gibt es eine große Anzahl von Gaswechselsanlagen, die in den Blatkammern einen leicht erhöhten Druck gegenüber der Atmosphäre aufweisen. Die Zielsetzung dabei ist, eine Minimierung der Messartefakte durch Lecks im Gaswechselsystem, speziell in der Blatkammer [30]. Bei homobarischen Blättern kann ein derartiger Druckgradient aber zu einem Massenfluss in den Blattinterzellularen führen, was wiederum unmittelbare Auswirkungen auf die Gaswechsellmessungen hat.

Die Fragestellung, welchen Einfluss eine laterale Diffusion oder ein druckabhängiger Massenfluss auf den Gaswechsel hat, wird anhand von zwei Experimenten an homo- und heterobarischen Blättern diskutiert.

8.1.3 Einfluss der Diffusion auf den Gaswechsel

Im ersten Ansatz wurde die Diffusion anhand des Gaswechsels an Blättern im Dunkeln gemessen. Die Messung dieser Dunkelatmung bei homobarischen Blättern zeigt eine deutliche Beeinflussung durch die CO_2 -Konzentration der Luft außerhalb der Blatkammer. In Abb. 8.2 (b) ist die Dunkelatmungsrate in Abhängigkeit von der CO_2 -Konzentration innerhalb und außerhalb der Blatkammer dargestellt. Die Dunkelatmung bei *Vicia faba* Abb. 8.2 (c) zeigt dabei eine apparente Stimulation oder Hemmung durch den CO_2 -Gradienten zwischen der Blatkammer und dem umgebenden Medium. Eine Erhöhung der externen CO_2 -Konzentration, im Vergleich zur CO_2 -Konzentration in der Blatkammer, führt zu einer apparenten Stimulation der Atmung, da das CO_2 von außen in die Blatkammer gelangt. Der umgekehrte Fall, eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration in der Blatkammer, hat eine Abnahme der apparenten Dunkelatmung der Pflanze zur Folge. Herrscht der gleiche CO_2 -Partialdruck in

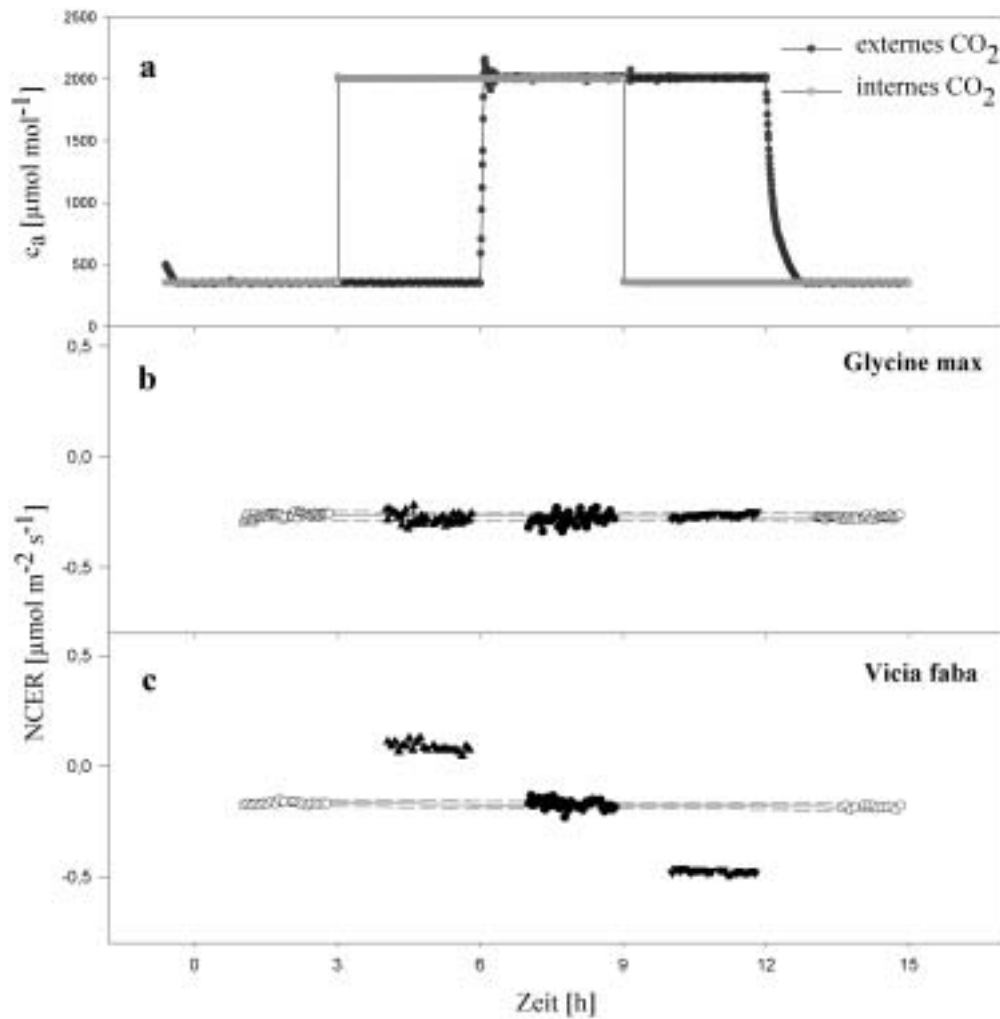


Abbildung 8.2: Gegenüberstellung der Dunkelatemungsraten von hetero- (b) und homo- (c) Pflanzen, (a): CO₂-Konzentration während des Versuchs mit dem CO₂-Partialdruck in der Blatkammer (internes CO₂) und außerhalb der Blatkammer (externes CO₂), (b) sowie (c): Atmungsraten bei unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen

der Blatkammer und dem Außenmedium, dann wird die Messung die Dunkelatmung nicht beeinflussen. Dabei liegt bei Hoch- und Niedrig CO₂ die gleiche Atmungsrate vor. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus der Literatur [29] an *Nicotiana tabacum*.

Die Gaswechselfmessungen bei heterobarischen Blättern werden von der CO₂-Konzentration der außerhalb der Blatkammer vorliegenden Luft nicht beeinflusst. Dies geht eindeutig aus den Messergebnissen bei *Glycine max* hervor (Abb. 8.2 (b)). Ein

bestehender CO_2 -Gradient von $1650 \mu\text{mol mol}^{-1}$ zwischen der Blattkammer und der externen Luft führte zu keiner Änderung der Dunkelatemungsraten. Die graphische Auswertung der in Abb. 8.2 (b) dargestellten Messergebnisse zeigt, dass es keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Atmungsraten bei gleicher internen und externen CO_2 -Konzentration und bei einem vorliegenden CO_2 -Gradienten gibt. Da die Respirationsraten unabhängig von der CO_2 -Konzentration den gleichen Verlauf aufweisen, wird weder die Respiration durch die absolute CO_2 -Konzentration, noch durch einen CO_2 -Gradienten zwischen Blattkammer und umgebender Luft beeinflusst (vgl. [29]).

8.1.4 Einfluss eines Druckgradienten zwischen Blattkammer und der umgebenden Atmosphäre auf den Gaswechsel

Besteht ein Druckgradient zwischen der Blattkammer und der Atmosphäre, dann wird der Gaswechsel der heterobarischen Blätter (Abb. 8.3 (a)) bei einer Erhöhung der Druckdifferenz bis auf 3 kPa (1 kPa=10 mbar) nicht beeinflusst.

Bei homobarischen Blättern hingegen führt eine konstante Druckerhöhung zu einer Beeinflussung des Gasaustauschprozesse. Dabei ergeben sich deutliche Unterschiede bei dem Gaswechsel im Dunkeln (Respirationsmessung Abb. 8.3 (b)) und im Licht (Photosynthesemessungen Abb. 8.3 (c)). Mit steigendem Druck nimmt die Respirationsrate sehr schnell ab und hat ab einer Druckdifferenz von ca. 0.5 kPa einen nahezu parallelen Verlauf zur Ordinate. Bei der Photosynthesemessung Abb. 8.3 (c) sieht man mit steigendem Druck eine fast konstante Abnahme der apparenten CO_2 -Austauschrate. Die Photosynthesemessung an heterobarischen Blättern (ohne Abb.) zeigt keine Beeinflussung durch laterale Diffusion.

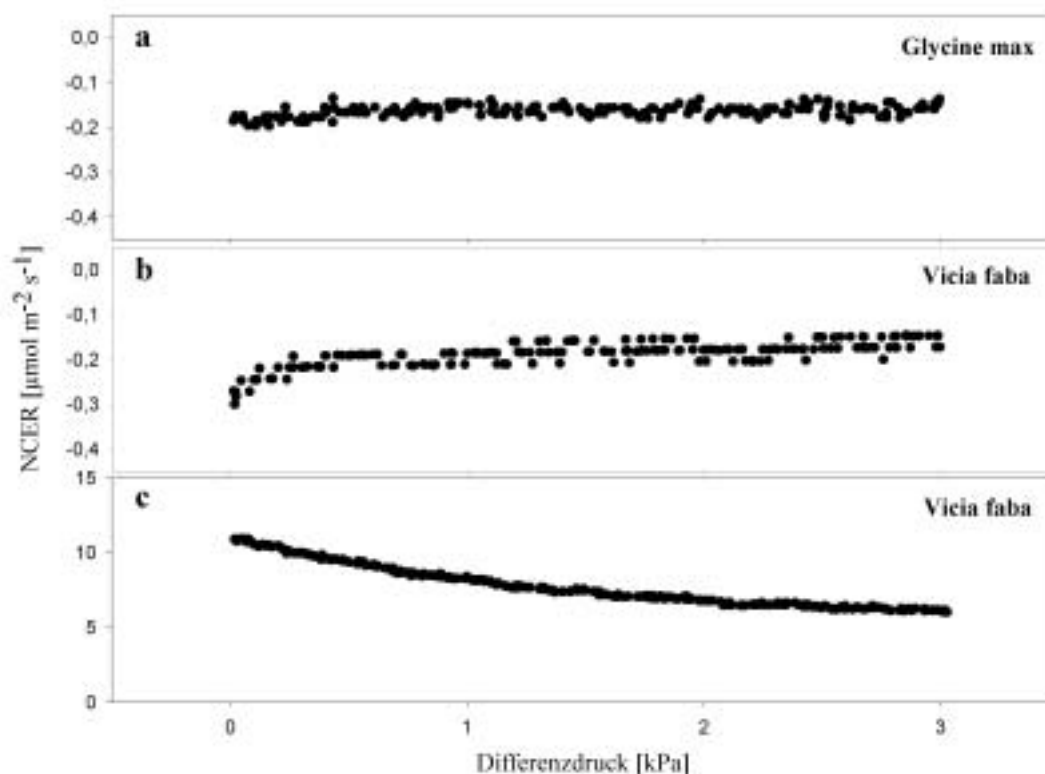


Abbildung 8.3: Gegenüberstellung der Respirations- (a) und (b) sowie Photosyntheseraten (c) in Abhängigkeit von dem Druckgradienten, gemessen bei konstanter CO_2 -Konzentration von $350 \mu\text{mol mol}^{-1}$ inner- und außerhalb der Blattkammer, (a): *Glycine max.* (b) und (c): *Vicia faba*

8.2 Fazit

Die lateralen Gasflüsse in den Blattinterzellularen finden eine geringe Berücksichtigung in der Literatur [95, 96]. Dennoch können laterale Gasströme, sei es durch Diffusion oder druckabhängigen Massenfluss in den Blattinterzellularen, zu erheblichen Messartefakten bei den Gaswechselfmessungen führen. Aus diesem Grunde ist die genaue Kenntnis und Charakterisierung dieser Vorgänge notwendig. Zielsetzung dabei ist, für zukünftige Gaswechselfmessungen diese Artefakte zu berücksichtigen und ggf. durch einen geeigneten Messaufbau auszuschließen.

Der Einsatz des **GT**PROZESSAS ist an den Experimenten für die Untersuchung des Einflusses der Diffusion und des Druckgradienten auf den Gaswechsel aufgezeigt worden. Für diese Experimente stellt das breite Spektrum für einen Einsatz des **GT**PROZESSAS im wissenschaftlichen Bereich eine wesentliche Basis [97] dar. Die modulare und leicht erweiterbare Struktur bietet dafür die ideale Voraussetzung. Weiterhin ist deutlich geworden, dass nicht nur die Standard-Verfahren bei Gaswechsellmessungen sondern auch spezifische Anforderungen der Pflanzenphysiologie durch den Einsatz des **GT**PROZESSAS beantwortet werden können.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen einer interdisziplinären Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich und der Universität Duisburg-Essen wurde ein Konzept für das **GTPROZESSAS** mit der Erweiterung eines bildgebenden Messverfahrens entwickelt, welches die Grundlage für die Beantwortung von wissenschaftlichen Fragestellungen, bezogen auf die Reaktion pflanzlicher Bio-Mechanismen auf äußere Umwelteinflüsse, darstellt.

Dieses Konzept beinhaltet die Automation zur Steuerung der äußeren Einflüsse von Gaswechsel- und Transportprozessen, womit die Möglichkeit einer gleichzeitigen und spezifizierten Beeinflussung der physikalischen Prozessgrößen besteht. Die Grundlage dafür bildet die programmierbare Steuerung in Kombination mit einer Microsoft Excel Steuerdatei. Damit können komplexe wissenschaftliche Experimente im Vorfeld geplant, durch das **GTPROZESSAS** ausgeführt und damit die Versuchsdurchführungen synchron und reproduzierbar beeinflusst werden.

Die Möglichkeit, die Messkomponenten nicht fragmentiert, sondern als ein logisch geschlossenes, einheitliches Messobjekt zu betrachten, führt zu einer Interpretation des Experiments schon während der Versuchsdurchführung und bildet damit eine wichtige Basis für den Einsatz in diesem Forschungsvorhaben.

Als eine deutliche Erweiterung für das **GTPROZESSAS** ist die Konzeption des bildgebenden Messverfahrens zu sehen. Durch den Einsatz der Bildverarbeitung können erstmals pflanzenmorphologische Informationen parallel zu den eingesetzten pflanzenphysiologischen Messmethoden gewonnen werden. Mit der Bildverarbeitung kann zukünftig das Pflanzenwachstum unmittelbar erfasst und analysiert werden.

Im ersten Ansatz wurde ein Konzept für die Berechnung der Blattfläche aus den Bildinformationen entwickelt, da diese als morphologische Größe wichtig für die Berechnung von Photosyntheseraten ist. In diesem Zusammenhang ist das bildgebende Messverfahren als Ergänzung zu den pflanzenphysiologischen Messmethoden zu sehen und kann mit diesen kombiniert und synchronisiert werden. Aufgrund dieser Konzeption wird auch das bildgebende Messverfahren integraler Bestandteil des Messobjekts. Dieser Aspekt ermöglicht den universellen Einsatz des **GTPROZESSAS** in den aktuellen, aber auch nach leichten Modifikationen, in den zukünftigen wissenschaftlichen Fragestellungen.

Durch den modularen Aufbau sind für das **GTPROZESSAS** Erweiterungen in jeder Hinsicht möglich. Seine leicht zu erweiternde Hard- und Softwarestruktur und die funktionale Trennung zwischen Prozess-Steuerung und Messsystem ermöglichen die Verwendung als Einzelkomponenten und können damit auch die Grundlage für zukünftige neue Mess- und/oder Automatisierungssysteme darstellen. Einen wichtigen Beitrag leisten dazu die verwendeten Standards im Bereich der Soft- (ActiveX, VISA, Microsoft Excel) und Hardwaresysteme (PXI/SCXI-Datenerfassungssystem, IEEE 1394, IEEE 488).

Bei dem entwickelten Konzept wurde bisher die Prozess-Steuerung und im Messsystem die Gaswechsellmessungen realisiert. Mit diesen Modulen wurde der Einsatz des **GTPROZESSAS** an den Experimenten für die Untersuchung des lateralen Gasflusses in Blattinterzellularen, an homo- und heterobarischen Blättern, aufgezeigt. Dabei ist dargestellt geworden, dass die Bandbreite für den Einsatz des **GTPROZESSAS** deutlich über die Standard-Verfahren, welche für die Untersuchung von Gaswechselprozessen bei kommerziellen Geräten eingesetzt werden, hinausgeht.

Die vorliegende Arbeit leistet einen wesentlichen Beitrag für die Untersuchung von Gaswechsel- und Transportprozessen an Pflanzen in Kombination mit einem bildgebenden Messverfahren. Dabei wird deutlich, dass durch den Einsatz des **GTPROZESSAS** die Voraussetzungen gegeben sind, pflanzenphysiologische Vorgänge zukünftig besser untersuchen und verstehen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Nisbet E.G. *Globale Umweltveränderungen*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994.
- [2] Meadows D.H. & Meadows D.L. *Die neuen Grenzen des Wachstums. Die Lage der Menschheit: Bedrohung und Zukunftschancen*. dva Stuttgart, 1992.
- [3] Beck-Texte im dtv. *Naturschutzgesetze des Bundes und der Länder*. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1995.
- [4] Alloway B.J. & Ayres D.C. *Schadstoffe in der Umwelt*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1996.
- [5] Larcher W. *Ökophysiologie der Pflanzen*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1994.
- [6] Häder D.P. *Photosynthese*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1999.
- [7] J. von Willert Dieter, Matyssek Rainer, and Herppich Werner. *Experimentelle Pflanzenökologie. Grundlagen und Anwendungen*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1995.
- [8] Hall D.O., Scurlock J.M.O., Bolhar-Nordenkamp H.R., Leegood R.C., and Long S.P. *Photosynthesis and Production in a Changing Enviroment*. Chapman & Hall London, 1993.
- [9] Ehleringer J. & Field C. *Scaling physiological processes: leaf to globe*. Academic Press, New York, 1993.

- [10] IPCC Working Group 2001. Summary for policymakers, a report of working group of the ipcc (intergovernment panel on climate change). Technical report, IPCC Working Group, 2001. www.IPCC.ch.
- [11] Ainsworth E.A., Davey P.A., Hymus G.J., Osborne C.P., Rogers A., Blum H., J. Nösberger, and S.P. Long. *Is stimulation of leaf photosynthesis by elevated carbon dioxide concentration maintained in the long term? A test with Lolium perenne grown for 10 years at two nitrogen fertilization levels under Free Air CO₂ Enrichment (FACE)*. Plant Cell and Environment 26:705-714, 2003.
- [12] Ainsworth E.A., Davey P.A., Hymus G.J., Graham J., Drake G., and Long S.P. *Long term response of photosynthesis to elevated carbon dioxide in a florida scrub-oak ecosystem*. Ecological Applications 12(5):1267-1275, 2002.
- [13] Long S.P., Scholes M.C., and Barker J.D. *Understanding the impact of rising CO₂: the contribution of environmental physiology*. Physiological plant ecology. British Ecological Society, Blackwell Science, Oxford., 1999.
- [14] Hennesy K.J., Gregory J.M, and Mitchell J.F.B. *Change in daily precipitation under enhanced greenhouse conditions*. Climate Dynamics, 1997.
- [15] Najjar R.G., Walker H.A., Anderson P.J., Barron E.J., Bord R.J., Gibson J.R., Kennedy V.S., and Knight C.G. *The potential impacts of climate change on the mid-Atlantic coastal region*. Climate Research, 2000.
- [16] Ward J.K. & Strain B.R. *Elevated CO₂ studies: past, present and future*. Tree Physiology 19: 211-220, 1999.
- [17] Van Bel Aart J.E. & Hess Paul. *Kollektiver Kraftakt zweier Exzentriker*. Biol. Unserer Zeit 33:220-230, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.
- [18] Lüttge U. & Higinbotham N. *Transport in plants*. Springer Verlag, New York, 1979.

- [19] Baker D.A. & Milburn J.A. *Transport of photoassimilates*. Longman Scientific & Technical Longman House, Harlow, Essex, 1989.
- [20] Marschner H. *Mineral nutrition of higher plants. Second edition*. Academic Press, London, 1995.
- [21] Schurr U. *Xylem sap sampling - new approaches to an old topic*. Trends Plant Sci. 3: 293-298, 1998.
- [22] Strassburger E. *Lehrbuch der Botanik*. Spektrum Verlag, Heidelberg, 2003.
- [23] Marschner H., Kirkby E.A., and Engels C. *Importance of cycling and recycling of mineral nutrients within plants for growth and development*. Bot. Acta 110: 265-273, 1997.
- [24] Schupp R., Glavac V., and Rennenberg. *Thiol composition of xylem sap of beech trees*. Phytochemistry 30: 1415-1418, 1991.
- [25] Jeschke W.D. & Pate J.S. *Cation and chloride partitioning through xylem and phloem within the whole plant of Ricinus communis L. under conditions of salt stress*. J. Exp. Bot. 42: 1105-1116, 1991.
- [26] Lawlor D.W. *Photosynthese*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1990.
- [27] Richard Leegood. *Advances in Photosynthese*. Kluwer Verlag, New York, 2000.
- [28] Sestak Z., Catsky J., and Jarvis P.G. *Plant Photosynthetic Production Manual of Methods*. The Hague Typography, 1971.
- [29] Jahnke S. *Atmospheric CO₂ concentration does not directly affect leaf respiration in bean or poplar*. Plant, Cell and Environment 24: 1139-1151, 2001.
- [30] Küppers M. & Häder D.P. *Methodik der Photosyntheseforschung- Messung und Interpretation des CO₂-Gasaustausches von intakten Blättern*. Thieme Verlag, New York, 1999.

- [31] Küppers M., Swan A.G., Tomkins D., and Gabriel D. *A field portable system for the measurment of gas exchange of leaves under natural and controlled conditions*. Plant Cell Enviroment 10: 425-435, 1987.
- [32] Von Caemmerer S. & Farquhar G.D. *Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves*. Planta 195, 1981.
- [33] Long S.P. & Hällgren J.E. *Measurement of CO₂ assimilation by plants in the field and the laboratory*. In *Photosynthesis and Production in a Changing Environment: A Field and Labratory Manual*. eds Hall D.O.; Scurlock J.M.O.; Bolhar-Nordenkamp; Leegood R.C. & Long S.P.; pp.129-167. Chapman & Hall, London, 1993.
- [34] Taiz L. & Zeiger E. *Physiologie der Pflanzen*. Spektrum Verlag, Heidelberg, 2000.
- [35] Alison Roberts. *BIO 311 Plant Anatomy Webside*. 2002. www.uri.edu/artsci/bio/plant-anatomy/106.html.
- [36] Van Bel A.J.E. *The phloem, a miracel of ingenuity*. Plant, Cell and Enviroment 26: 125-149, 2003.
- [37] Jahnke S., Schlesinger U., Feige G.B., and Knust E.J. *Transport of photoassimilates in young trees of Fraxinus and Sorbus: measurement of translocation in vivo*. Botanica Acta 111: 307-315, 1998.
- [38] Minchin P.E.H. & Troughton J.H. *Quantitative interpretation of phloem translocation data*. Ann. Rev. Plant Physiol 31: 191-216, 1980.
- [39] Jahnke S., Bier D., Estruch J.J., and Beltran J.P. *Distribution of photoassimilates in the pea plant: chronology of events in non-fertilized ovaries and effects of gibberillic acid*. Planta 180: 53-60, 1989.
- [40] Schmidt H.U. *Messelektronik in der Kernphysik*. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1986.

- [41] RCA Corporation. *Photomultiplier Handbook*. RCA Solid State Division, Electro Optics and Devices, Lancaster, PA 17604, 1980.
- [42] National Instruments. *Increase Your Organization's Productivity With LabVIEW*. National Instruments, 11500 North Mopac Expressway, Austin, TX 78759-3504 USA, 2000.
- [43] National Instruments. *Measurement and Automation Catalog*. National Instruments, 2003. www.ni.com.
- [44] Proff B. *LabVIEW Moderne Programmierumgebung für die Mess- und Automatisierungstechnik*. Studienarbeit an der Universität Duisburg-Essen, Fachbereich 12 Maschinenwesen, 2002.
- [45] Pichlik Herbert & Klein Martin. *Software in Bildern*. CT Magazin für Computer Technik 5: 230-237, 1998.
- [46] Wells Lisa & Travis Jeffrey. *Das LabVIEW-Buch*. Prentice Hall Verlag, München, 1996.
- [47] Jamel Raman & Hagestedt Andre. *LabVIEW Das Grundlagenbuch 3. Auflage*. Addison Wesley Verlag, München, 2001.
- [48] PXI System Alliance. *PXI Hardware Specificationen*. PXI System Alliance, 2003. www.pxisa.org.
- [49] National Instruments. *PXI Solutions CompactPCI for measurement and automation*. National Instruments, 2001/02. www.ni.com/support/pxisupp.htm.
- [50] Jamel Rahman & Dahmen Prof. Norbert. *Virtuelle Instrumente auf Echtzeit-Kurs PC-basierte Mess- und Regelungstechnik für Echtzeit-Anwendungen*. Elektronik 8: 44-48, 2000.
- [51] Jamel Rahman & Illig Heinrich. *Die Leichtigkeit des Echtzeitprogrammierens*. Design & Elektronik Embedded Control 2: 24-26, 1999.

- [52] National Instruments. *FieldPoint Rugged Intelligent and Distributed I/O Systems*. National Instruments, 2002. www.ni.com/support/ftpssupp.htm.
- [53] Klier Jochen. *Ethernet im industriellen Einsatz mit FieldPoint*. Elektronik Informationen 4: 48-51, 2000.
- [54] Gindorf Christian. *LabVIEW goes Linux*. Elektronik Industrie 12: 78-81, 1999.
- [55] National Instruments. *Funktionen- und VI-Referenzhandbuch*. National Instruments, 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas 78759, 1998.
- [56] National Instruments. *Referenzhandbuch zur Programmierung in G*. National Instruments, 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas 78759, 1998.
- [57] National Instruments. *Grundlagen der Datenerfassung*. National Instruments, 11500 North Mopac Expressway, Austin, Texas 78759, 1998.
- [58] LI-COR Inc. *CO₂,H₂O Analyzer Instruction Manual*. LI-COR Inc.; 4308 Progressive Avenue; Lincoln NE68504, 2000. www.licor.com.
- [59] Bronkhorst High-Tech B.V. *Thermal Mass Flow Meters And Controllers for Gases*. Bronkhorst High-Tech B.V.; Nijverheidsstraat 1A; 7261 AK Ruurlo; Netherlands, 2002. www.bronkhorst.com/pdf/folder-el-flw.pdf.
- [60] National Instruments. *SCXI-1112 User Manual*. Number 322476A-01. National Instruments, 1999. www.ni.com/support/scxisupp.htm.
- [61] National Instruments. *Information on Cold Junction Compensation (CJC) Sensors*. National Instruments, 2002. www.ni.com/support/scxisupp.htm.
- [62] Basler Vision Technologies. *Basler 302f Camera User's Manual*. Basler Vision Technologies; An der Strusbeck 60-62; 22926 Ahrensberg, 2002. www.baslerweb.com.
- [63] Carl Zeiss Jena GmbH. *VISIONMES Telezentrische Objektiv-Systeme*. Industrielle Optik von Carl Zeiss; 07740 Jena, 2003. www.zeiss.de/optik.

- [64] Linos AG. *Gesamtkatalog 2002*. Linos AG; Königsallee 23; 37081 Göttingen, 2002. www.linos.de.
- [65] Davis P.J. *Interpolation and Approximation*. Dover, New York, 1975.
- [66] Lancaster P. & Salkauskas K. *Curve and Surface Fitting. An Introduction*. Academic Press, London, 1986.
- [67] Wolberg G. *Digital Image Warping*. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, 1990.
- [68] Proakis J.G. & Manolakis D.G. *Digital Signal Processing. Principles, Algorithms, and Applications*. McMillan, New York, 1992.
- [69] Huang T.S. *Two-dimensional Digital Signal Processing1, Linear Filters*. Bd. 42 von Topics in Applied Physics. Springer, New York, 1981.
- [70] Huang T.S. *Two-dimensional Digital Signal Processing 2, Transforms and Median Filters*. Bd. 43 von Topics in Applied Physics. Springer, New York, 1981.
- [71] Sedgewick R. *Algorithmen*. Addison-Wesley, Bonn, 8. Aufl., 1992.
- [72] Marr D. & Hildreth E. *Theory of edge detection*. Proc. Royal Society, London, Ser. B, 270: 187-217, 1980.
- [73] Marr D. *Vision*. W. H. Freeman and Company, New York, 1982.
- [74] Serra J. *Image analysis and mathematical morphology*. Academic Press, London, 1982.
- [75] Klette R. & Zamperoni P. *Handbuch der Operatoren für die Bildverarbeitung, 2. Auflage*. Vierweg Verlag, Wiesbaden, 1995.
- [76] Aho A., Hopcroft J., and Ullman J. *Data structure and algorithms*. Addison Wesley, Reading, MA, 1983.
- [77] Pitas I. *Digital Image Processing Algorithmus*. Prentice Hall, New York, 1993.

- [78] Umbaugh S.E. *Computer Vision and Image Processing: A Practical Approach Using CVIPTools*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1998.
- [79] Kresch R. & Malah D. *Multi-parameter skeleton decomposition*. Serra J. & Soille P., eds, Mathematical morphology and its applications to image processing, Kluwer Academic Publishers, pp. 141-148, 1994.
- [80] Meyer F. *Skeletons in digital spaces*. Serra J., ed., Image analysis and mathematical morphology. Volume 2: Theoretical advances, Academic Press, London, chapter13, pp. 257-296, 1988.
- [81] Peleg S. & Rosenfeld A. *A min-max medial axis transform*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 3: 208-210, 1981.
- [82] Beucher S. *Digital skeletons in Euclidean and geodesic spaces*. Signal Processing 38: 127-141, 1994.
- [83] Blum H. *Biological shape and visual science (part 1)*. Journal of Theoretical Biology 38: 205-287, 1973.
- [84] Vincent L. *Morphological area openings and closing for greyscale images*. Proc. Shape in Picture 92, NATO Workshop, Springer-Verlag, Driebergen, The Netherlands, 1992.
- [85] Vincent L. *Grayscale area openings and closings, their efficient implementation and applications*. Serra J. & Salembier, eds, Proc. EURASIP workshop on Mathematical morphology and its application to signal processing, Barcelona, pp. 22-27, 1993.
- [86] Reiss T.H. *Recognizing Planar Objects Using Invariant Image Features*. Bd. 676 von Lecture notes in computer science. Springer, Berlin, 1993.
- [87] Burkhardt H. & Siggelkow S. *Invariant features in pattern recognition - fundamentals and applications*. C. Kotropoulos und Pitas I., Hrsg., Nonlinear Model-Based Image/Video Processing and Analysis, S. 269-307. John Wiley & Sons, 2001.

- [88] Miano John. *The programmer guide to compressed images files: Jpeg, Png, Gif, Xbm, Bmp*. Addison-Wesley Pub Co, Boston, 2003.
- [89] Strutz Tilo. *Bilddatenkompression: Grundlagen, Codierung, JPEG, MPEG, 2. Auflage*. Vieweg Verlag Wiesbaden, 2002.
- [90] LI-COR Inc. *Portable Photosynthesis System*. LI-COR Inc.; 4308 Progressive Avenue; Lincoln NE68504, 2003. www.licor.com.
- [91] Neger F.W. *Spaltöffnungsschluß und künstliche Turgorsteigerung*. Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft 30: 179-194, 1912.
- [92] Neger F.W. *Die Wegsamkeit der Laubblätter für Gase*. Flora 111: 152-161, 1918.
- [93] Esau K. *Anatomy of Seed Plants*. John Wiley & Sons, New York, 1977.
- [94] Terashima I., Wong S.C., Osmond C.B., and Farquhar G.D. *Characterisation of non-uniform photosynthesis induced by abscisic acid in leaves having different mesophyll anatomies*. Plant Cell Physiology 29: pp. 385-394, 1988.
- [95] Terashima I. *Anatomy of non-uniform photosynthesis*. Photosynthesis Research 31: 195-212, 1992.
- [96] Jahnke S. & Krewitt M. *Atmospheric CO₂ concentration may directly affect leaf respiration measurement in tobacco, but not respiration itself*. Plant, Cell and Enviroment 30: 641-651, 2001.
- [97] Jahnke S. & Proff B. *Gas exchange measurment on plants using LabVIEW*. Virtuelle Instrumente in der Praxis: Begleitband zum Kongress VIP 2001, (eds. Jamel R. & Jaschinski), pp. 52-57 Hüthig Verlag, Heidelberg, 2001.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Stark vereinfachte Darstellung der Grundstruktur des Hardwaresystems für Gaswechsel- und Translokationsmessungen	10
3.1	Prinzipieller Aufbau eines geschlossenen Gaswechselsmesssystems . . .	18
3.2	Prinzipieller Aufbau eines einfachen, offenen, differentiellen Gaswechselsmesssystems	20
3.3	Vereinfachte Gesamtdarstellung der Gaswechselanlage	23
3.4	Querschnittsdarstellung des Leitbündels vom <i>Ranunculus repens</i> (dt. Bez. Hahnenfuss)	25
3.5	Versuchsaufbau für Translokationsmessungen	28
3.6	Stark vereinfachte Darstellung der Auswerteelektronik für die Translokationsmessungen	30
4.1	Grundidee für den Entwurf des GT_{PROZESSAS}	36
4.2	Typischer Versuchsablauf für ein wissenschaftliches Experiment aus dem Bereich der Pflanzenphysiologie	40
6.1	Entwickelte Grundstruktur aus der Funktionalität des GT_{PROZESSAS}	56
6.2	Blockschaltbild des entwickelten Grundkonzepts für das GT_{PROZESSAS} mit den erforderlichen technischen Einrichtungen	57
6.3	Strukturelle Gesamtdarstellung der technischen Einrichtungen für das GT_{PROZESSAS}	60
6.4	Konzeptioneller Aufbau des Hardwaresystems für das GT_{PROZESSAS}	61

6.5	Kommunikation von FieldPoint-Modulen mit dem Host-System . . .	66
6.6	Softwaresystem des GT_{PROZESS}AS mit den beiden Bereichen System- und Anwendersoftware	68
6.7	Grundlegende Softwarestruktur für die Programmmodule der Anwen- dersoftware im GT_{PROZESS}AS	70
6.8	Stark vereinfachte Struktur der Programmmodule für die Prozess- Steuerung	72
6.9	Benutzeroberfläche für die manuelle Steuerung GT_{PROZESS}AS	73
6.10	Benutzeroberfläche für die Anzeige des Ist-Zustands der Aktoren im Gaswechselsystem	74
6.11	Programmstruktur der programmierbaren Steuerung für die Abarbei- tung der Microsoft Excel Steuerdatei	76
6.12	Benutzeroberfläche der programmierbaren Steuerung für die Abarbei- tung der Excel Steuerdatei	77
6.13	Programmmodul für das Importieren der Microsoft Excel Steuerdatei	78
6.14	Microsoft Excel Tabelle für die Steuerung von pflanzenphysiologischen Experimenten	80
6.15	Programmmodul für die Auswertung von Datum und Uhrzeit aus der Microsoft Excel Steuerdatei	81
6.16	Auswertemodul für den Start der Rampenfunktion über die MS Excel Steuerdatei	82
6.17	Auswertemodul für den Parameter <i>Digital out</i> der Excel Steuerdatei .	83
6.18	Stark vereinfachte Softwarestruktur des Messsystems	84
6.19	Programmstruktur des Messsystems für die Gaswechselprozesse . . .	85
6.20	Stark vereinfachte Struktur der Messdatenerfassung für die Gaswech- selmessungen	86
6.21	Programmierung der DAQ-Ereignissteuerung für die Gaswechselmes- sungen in LabVIEW	87
6.22	Initialisierung des LabVIEW Gerätetreibers für den LI-7000	89
6.23	LabVIEW Gerätetreiber für den LI-7000	90

6.24	Prinzipielle Darstellung der Messdatenerfassung für die Massendurchfluss-Messgeräte über einen DDE-Server	91
6.25	Programmmodul für die Kommunikation mit dem Bronkhorst Server Flow-DDE	92
6.26	Microsoft Excel Datei für die Kalibrierung der physikalischen Prozessgrößen	93
6.27	Programmmodul zur Auswertung der Microsoft Excel Datei für die Kalibrierung der physikalischen Prozessgrößen	94
6.28	Programmmodul für die Berechnung der pflanzenphysiologischen Zusammenhänge bei den Gaswechsellmessungen	95
6.29	Format der Metadaten für die filebasierte Datenbank	99
7.1	Telezentrische Abbildung der Gegenstandsebene auf die Bildebene . .	107
7.2	LabVIEW Programmmodul für die Digitalkamera fs302 mit externer Synchronisierung	110
7.3	Struktur des Softwaremoduls für das bildgebende Messverfahren . . .	111
7.4	Hierarchie der Bildverarbeitungsoperationen von der Bildvorverarbeitung bis zur Klassifizierung	113
7.5	Bildverarbeitungsoperationen mit Hilfe von 2D-Rechteckfiltern	116
7.6	Sobel-Verfahren für die Kantendetektion	117
7.7	Bild-zu-Bild-Transformation	120
7.8	Formanalyse durch Skelettierung	121
7.9	Flächenbestimmung	122
8.1	Schematische Darstellung der Querschnitte von homobarischen und heterobarischen Blättern	129
8.2	Einfluss der Diffusion auf den Gaswechsel	131
8.3	Einfluss des Druckgradienten auf den Gaswechsel	133

Tabellenverzeichnis

3.1	Aktoren und Regler für das GT_{PROZESSAS}	31
3.2	Diskrete Aktoren für das GT_{PROZESSAS}	32
3.3	Sensoren für das GT_{PROZESSAS}	33
3.4	Temperatur-Sensoren für das GT_{PROZESSAS}	34
3.5	Sensoren und Aktoren mit entsprechender Schnittstelle für eine Kommunikation über die RS-232	34
6.1	Konfiguration der I/O-Module für das PXI/SCXI-Datenerfassungssystem und deren Funktion im GT_{PROZESSAS}	63
6.2	Aufbau eines Datenfiles für die filebasierte Datenbank	97
6.3	Position der Daten im archivierten Datenfile	98
7.1	Gegenüberstellung der spezifischen Eigenschaften einer Standard Digital- oder Analogkamera	105